

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

DIZERTAČNÍ PRÁCE

Brno, 2019

Ing. Helena Votavová



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**LABORATOŘ PŘENOSU TEPLA A PROUDĚNÍ**

HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW LABORATORY

**VÝVOJ NOVÝCH PŘÍSTUPŮ V ODSTRAŇOVÁNÍ OKUJÍ  
PŘI KONTINUÁLNÍ VÝROBĚ OCELI S VYUŽITÍM  
VYSOKOTLAKÉHO VODNÍHO PAPRSKU**

DEVELOPMENT OF NEW APPROACHES IN DESCALING IN THE CONTINUOUS PRODUCTION OF STEEL  
USING HIGH-PRESSURE WATER JET

**DIZERTAČNÍ PRÁCE**

DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Ing. Helena Votavová**

**ŠKOLITEL**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Michal Pohanka, Ph.D.**

**ŠKOLITEL SPECIALISTA**

SUPERVISOR SPECIALIST

**doc. Ing. Petr Kotrbáček, Ph.D.**

**BRNO 2019**



## ABSTRAKT

Práce shrnuje základní a aktuální poznatky v oblasti odstraňování okují při kontinuální výrobě oceli za tepla s využitím vysokotlakého vodního paprsku a navrhuje další zefektivnění tohoto procesu v průmyslové výrobě.

První část práce se zabývá vznikem, strukturou a fyzikálními vlastnostmi okují. Druhá část popisuje samotné principy odstraňování okují s využitím vysokotlakého vodního paprsku. Třetí část se věnuje popisu konkrétních typů experimentů, sloužících ke studiu vysokotlakého vodního paprsku. Čtvrtá část se věnuje popisu provedených experimentů a jejich vyhodnocení a představuje tak těžiště dizertační práce. Je rozdělena na šest sekcí, které samostatně řeší předem definované cíle dizertační práce.

První sekce praktické části se zaměřuje na vývoj výšky a struktury okují u ocelí 54SiCr6 a HDT580X. Bylo prokázáno, že výška vytvářených okují roste s časem a teplotou oxidace. Zároveň byla ověřena vrstevnatá povaha vytvářených okují.

Druhá sekce zkoumá vliv změny stabilizátoru trysky na fokusaci a rozložení impaktního tlaku trysky. Bylo prokázáno, že lze dosáhnout zvýšení průměrného maximálního tlaku trysky až o 11 %, v závislosti na typu trysky a délce stabilizátoru.

Třetí sekce se zabývá analýzou stínografických fotografií struktur vodních paprsků u odkujovacích trysek. V rámci dizertační práce byl vyvinut skript pro analýzu těchto fotografií pomocí adaptivního prahování. Zjištěné poznatky jsou korelovány pomocí regresní analýzy s průměrným součinitelem přestupu tepla. U většiny navržených standardních konfigurací trysek dochází ve výšce válcovaného povrchu k rozpadu vodního proudu na drobné kapky.

Čtvrtá sekce se věnuje oblasti překryvu vodních paprsků, především pak oblasti tzv. washoutu, kde je impaktní tlak jedné trysky redukován proudem trysky druhé. Je zkoumán vliv změny tlaku a vzájemného přesazení odkujovacích trysek. Analýza prokázala, že změna tlaku nemá statisticky vliv na procentuální redukci impaktního tlaku v oblasti washoutu. Bylo prokázáno, že pokud je oblast washoutu široká, může docházet ke snížení efektivity odstraňování okují v této oblasti.

Pátá sekce navazuje na sekci předchozí a zaměřuje se přímo na oblasti překryvu vodních paprsků. Je zkoumán vliv změny natočení a rozteče páru odkujovacích trysek. Experimenty ukázaly, že malé změny rozteče trysek nemají významný vliv na impaktní tlak a součinitel přestupu tepla. Vliv natočení trysek naopak představoval významný faktor pro efektivitu a homogenitu odkoujení povrchu.

Poslední sekce se zabývá vlivem rychlosti válcovací tratě na součinitel přestupu tepla při procesu odstraňování okují. S využitím regresního modelu bylo prokázáno, že s vyšší rychlostí válcování dochází ke snížení průměrného součinitele přestupu tepla.

Závěr práce shrnuje konkrétní výsledky dizertační práce a jsou navrženy kroky, kterými lze v průmyslu zefektivnit proces odstraňování okují.

## KLÍČOVÁ SLOVA

okuje, hydraulické odstraňování okují, vysokotlaké trysky, součinitel přestupu tepla, stínografie, impaktní tlak, eroze, válcování za tepla, kvalita povrchu



## **ABSTRACT**

The thesis summarizes general and up-to-date knowledge of descaling during the continuous production of the hot-rolled steel and proposes further streamlining of this process in industrial production.

The first chapter of the thesis deals with the origin, structure and physical properties of the scales. The second chapter describes the principles of descaling by using a high pressure flat water jet. The third chapter introduces the principles of the experimental methods and describes the used laboratory equipment. The fourth chapter summarizes the description of the particular experiments and their evaluation, and thus represents the focus of the dissertation. It is divided into six sections which independently solve predefined objectives of the dissertation.

The first section focuses on the height and structure development of the scales on 54SiCr6 and HDT580X steels. It has been proven that the height of the formed scales increases with the time and temperature of the oxidation. The layered nature of the scales was verified at the same time.

The second section examines the effect of the nozzle stabilizer on the focussing and distribution of the impact pressure of the nozzle. Experiments have shown that increase of 11 % of an average maximum nozzle pressure can be achieved, depending on the type of nozzle and the length of the stabilizer.

The third section deals with the analysis of shadowgraphy images of water jet structures of the nozzles. A script was developed for analysis of these shadowgraphy photos by an adaptive thresholding. The findings are correlated using a regression analysis with an average heat transfer coefficient. It has been reported that most of the standard nozzle configurations produced disintegrated stream of little droplets at the height of the rolled surface.

The fourth section focuses on the area of water jet overlap, especially the area of the so-called washout, where the impact pressure of one nozzle is reduced by the nozzle stream of the other. The influence of the pressure change and the mutual displacement of the nozzles is investigated. The analysis showed that the change of pressure did not have any effect on the percentage of reduction of the impact pressure in the area of the washout. It has been shown that if the area of the washout is wide the descaling efficiency in this area may be reduced.

The fifth section builds on the previous section and focuses directly on the areas of waterjet overlaps. The influence of the change of rotation and pitch of the nozzles is studied. Experiments have shown that small changes in nozzle pitch do not have a significant impact on impact pressure and heat transfer coefficient. The effect of nozzle rotation, on the other hand, was a significant factor for the efficiency and homogeneity of the descaling of the surface.

The last section deals with the effect of the rolling speed on the heat transfer coefficient in the descaling process. The regression model has shown that with a higher rolling speed there is a reduction in the average heat transfer coefficient.

Conclusion summarizes the results of the dissertation and proposes which findings can be used in the industry to make the descaling process more effective.

## **KEYWORDS**

scales, hydraulic descaling, high-pressure nozzles, heat transfer coefficient, shadowgraphy, impact pressure, erosion, hot rolling, surface quality

VOTAVOVÁ, Helena *Vývoj nových přístupů v odstraňování okují při kontinuální výrobě oceli s využitím vysokotlakého vodního paprsku*: dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Laboratoř přenosu tepla a proudění, 2016. 189 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Michal Pohanka, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou doktorskou práci na téma „Vývoj nových přístupů v odstraňování okují při kontinuální výrobě oceli s využitím vysokotlakého vodního paprsku“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího doktorské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autorka uvedené doktorské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této doktorské práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědoma následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autorky



## PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu své dizertační práce doc. Ing. Michalu Pohan-  
kovi, Ph.D. za odborné vedení, pomoc při realizaci experimentů, konzultace, podnětné  
návrhy k práci a nekonečnou trpělivost. Dále bych ráda poděkovala Ing. Martinu Cha-  
bičovskému, Ph.D. za pomoc při realizaci experimentů souvisejících s oxidací ocelí a  
Ing. Michalu Zeleňákovi, Ph.D. z Ústavu Geoniky AVČR za pomoc a spolupráci při po-  
řízení a vyhodnocení stínografických fotografií vodních paprsků. Velký dík patří celému  
kolektivu Laboratoře přenosu tepla a proudění za přátelskou a podnětnou atmosféru,  
kterou zde všichni společně vytvářejí a bez které by tato práce vznikala jen těžko.  
Dále bych ráda poděkovala svému muži za podporu při studiu, korektury a typografické  
připomínky k práci, své dceři pak za trpělivost se mnou.

Brno .....

.....

podpis autorky



# Obsah

<b>Vymezení cílů dizertační práce</b>	<b>1</b>
<b>Úvod</b>	<b>3</b>
<b>1 Okuje a jejich vlastnosti</b>	<b>5</b>
1.1 Válcování za tepla . . . . .	5
1.2 Vznik okují . . . . .	7
1.3 Parametry ovlivňující vznik okují . . . . .	9
1.3.1 Příměsi ocelí . . . . .	9
1.3.2 Povlakování . . . . .	12
1.4 Modely růstu okují . . . . .	12
1.5 Fyzikální vlastnosti okují . . . . .	14
<b>2 Hydraulické odstraňování okují</b>	<b>17</b>
2.1 Fyzikální principy odstranění okují . . . . .	17
2.2 Konstrukce trysek . . . . .	18
2.3 Hlavní parametry nastavení trysek . . . . .	19
2.3.1 Fixní parametry trysek . . . . .	19
2.3.2 Parametry nastavení konfigurace . . . . .	21
2.4 Veličiny odvozené z nastavení trysky . . . . .	22
<b>3 Typy experimentů</b>	<b>25</b>
3.1 Focení struktury paprsku . . . . .	25
3.2 Měření impaktních tlaků . . . . .	27
3.3 Měření eroze vodního paprsku . . . . .	30
3.4 Měření homogenity chlazení a součinitele přestupu tepla . . . . .	31
3.4.1 Měření součinitele přestupu tepla . . . . .	32
3.4.2 Měření homogenity chlazení . . . . .	35
3.5 Měření kvality odkujení . . . . .	35
<b>4 Praktická část</b>	<b>39</b>
4.1 Nalezení vhodného typu oceli a parametrů oxidace pro prokazatelná měření kvality odkujení . . . . .	41



4.1.1	Ocel 54SiCr6 . . . . .	41
4.1.2	Ocel S235JR . . . . .	50
4.1.3	Ocel HDT580X . . . . .	50
4.1.4	Závěr výzkumného cíle . . . . .	51
4.2	Experimentální určení vlivu stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku vodního paprsku . . . . .	52
4.2.1	Výběr trysek . . . . .	52
4.2.2	Impaktní tlak trysek . . . . .	53
4.2.3	Závěr výzkumného cíle . . . . .	55
4.3	Obrazová analýza struktury vodního paprsku . . . . .	56
4.3.1	Výběr trysek . . . . .	56
4.3.2	Analýza stínografické fotografie . . . . .	57
4.3.3	Impaktní tlak trysek . . . . .	61
4.3.4	Součinitel přestupu tepla . . . . .	63
4.3.5	Závěr výzkumného cíle . . . . .	66
4.4	Studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků . . . . .	67
4.4.1	Geometrický model . . . . .	67
4.4.2	Výběr trysky . . . . .	71
4.4.3	Impaktní tlak trysek . . . . .	72
4.4.4	Měření kvality odkujení . . . . .	75
4.4.5	Závěr výzkumného cíle . . . . .	79
4.5	Nalezení optimálních úhlů natočení a roztečí trysek pro potlačení nehomogenity odkujení v oblasti překryvu . . . . .	80
4.5.1	Výběr trysky . . . . .	80
4.5.2	Impaktní tlak trysek . . . . .	81
4.5.3	Eroze vodního paprsku . . . . .	87
4.5.4	Měření homogenity chlazení . . . . .	89
4.5.5	Součinitel přestupu tepla . . . . .	91
4.5.6	Měření kvality odkujení . . . . .	93
4.5.7	Závěr výzkumného cíle . . . . .	98
4.6	Studium vlivu rychlosti posuvu ve směru válcování na součinitel přestupu tepla . . . . .	100
4.6.1	Impaktní tlak trysek . . . . .	100
4.6.2	Součinitel přestupu tepla . . . . .	101
4.6.3	Závěr výzkumného cíle . . . . .	109

<b>Literatura</b>	<b>117</b>
<b>Vlastní publikace vztahující se k dizertaci</b>	<b>125</b>
<b>Ostatní vlastní publikace</b>	<b>127</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>129</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>139</b>
<b>A Nalezení vhodného typu oceli a parametrů oxidace pro prokazatelná měření kvality odkujení</b>	<b>141</b>
A.1 Ocel 54SiCr6 . . . . .	142
A.1.1 Struktura okují při teplotě oxidace 900 °C . . . . .	142
A.1.2 Struktura okují při teplotě oxidace 1 050 °C . . . . .	143
A.1.3 Struktura okují při teplotě oxidace 1 200 °C . . . . .	144
A.2 Ocel HDT580X . . . . .	148
<b>B Experimentální určení vlivu stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku vodního paprsku</b>	<b>149</b>
<b>C Obrazová analýza struktury vodního paprsku</b>	<b>155</b>
<b>D Experimentální studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků</b>	<b>163</b>
<b>E Nalezení optimálních úhlů natočení a roztečí trysek</b>	<b>175</b>
<b>F Experimentální studium vlivu rychlosti posuvu ve směru válcování na součinitel přestupu tepla</b>	<b>181</b>



# Vymezení cílů dizertační práce

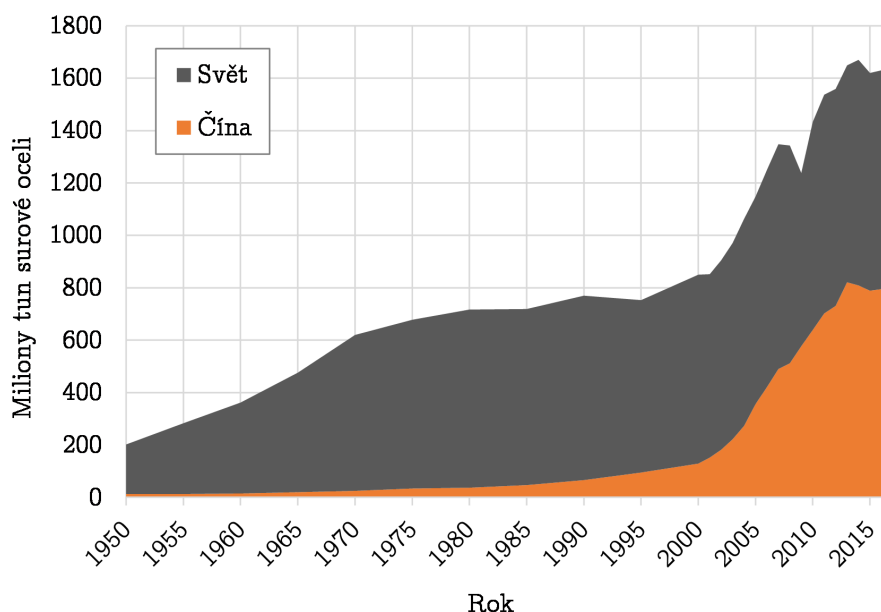
Cíle dizertační práce je možné formulovat do následujících hlavních bodů:

- Nalezení vhodného typu oceli a parametrů oxidace pro prokazatelná měření kvality odkujení.
- Experimentální určení vlivu stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku vodního paprsku.
- Obrazová analýza struktury vodního paprsku z dat pořízených pomocí stínografické metody a vliv této struktury na součinitel přestupu tepla.
- Experimentální studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků.
- Nalezení optimálních úhlů natočení a roztečí trysek, aby byla co nejvíce potlačena nehomogenita při odkujování vznikající v oblasti překryvu vodních paprsků.
- Experimentální studium vlivu rychlosti posuvu ve směru válcování na součinitel přestupu tepla.



# Úvod

Ocel je v průmyslu v současné době základním vstupním materiálem pro výrobu. K hlavní roli oceli napomáhá především její všestranné použití, vhodné fyzikální a chemické vlastnosti a cena na světových trzích. Ocelářský průmysl je po ropném průmyslu druhým největším na světě s globálním odhadovaným obratem 900 miliard USD [69]. Ve stavebnictví je ocel po betonu nejpoužívanějším materiálem z hlediska spotřeby. Ke stabilnímu nárůstu výroby od začátku 20. století, taženém především Evropou a Spojenými státy americkými, se v 60. a 70. letech přidal efekt japonské a korejské industrializace, následovaný masivním nárůstem výroby počátkem 21. století v důsledku zapojení Číny do výrobního procesu (viz obr. 1). V následujících letech se ovšem očekává pouze mírný nárůst výroby, který byl patrný již v roce 2014.



Obr. 1: Historie produkce oceli s vyznačeným podílem Číny [69]

Z celkové světové výroby oceli je stabilně 15–25 % dále zpracováno válcováním za tepla [69]. Válcováním za tepla lze vyrobit široké spektrum polotovarů i finálních výrobků. Především se jedná o plechy, tvarové profily, nosníky, kolejnice, bezešvé trubky i dráty větších průměrů. Nutnou podmínkou pro válcování za tepla je nahřátí materiálu na příslušnou teplotu (nad teplotu rekrytalizace materiálu), aby materiál snadněji podlehl přetvoření.

Nerozlučně s vysokou teplotou materiálu je spojena i jeho povrchová oxidace v atmosféře a pomalé vytváření vrstvy oxidů železa (okují). Tento jev jde samozřejmě proti požadavkům zákazníků, kteří kladou důraz na co nejlepší kvalitu povrchu výrobku. Jednou z nejúčinnějších a nejvíce používaných metod je hydraulické odstraňování okují pomocí vysokotlakých trysek s plochým vodním paprskem. K odstranění okují dochází před samotným válcováním povrchu oceli a tím vzniká i výrazné chlazení povrchu, které může znesnadnit samotný proces válcování.

K analýze samotného procesu odstranění okují se používají metody jak experimentální, tak metody matematického modelování. Tato práce se zaměřuje převážně na experimentální část a mimo jiné navazuje také na práce [21] a [66], kde jsou již metody matematického modelování podrobně popsány.

## Okuje a jejich vlastnosti

Nerozlučnou součástí při zpracování oceli za tepla je tvorba oxidů železa a dalších příměsí na jeho povrchu. Tyto sloučeniny se souhrnně v průmyslu nazývají okuje [B1]. Při válcování oceli za tepla představují okuje významnou komplikaci, neboť mohou významně ovlivnit kvalitu válcovaného povrchu a výrazně snížit životnost pracovních válců.

Tato kapitola stručně popisuje celý proces válcování za tepla, jeho specifiky a požadavky. Dále se podrobně zabývá rozdělením okují, jejich mechanismem vzniku a růstu v průběhu procesu oxidace a jejich fyzikálními vlastnostmi.

### 1.1 | Válcování za tepla

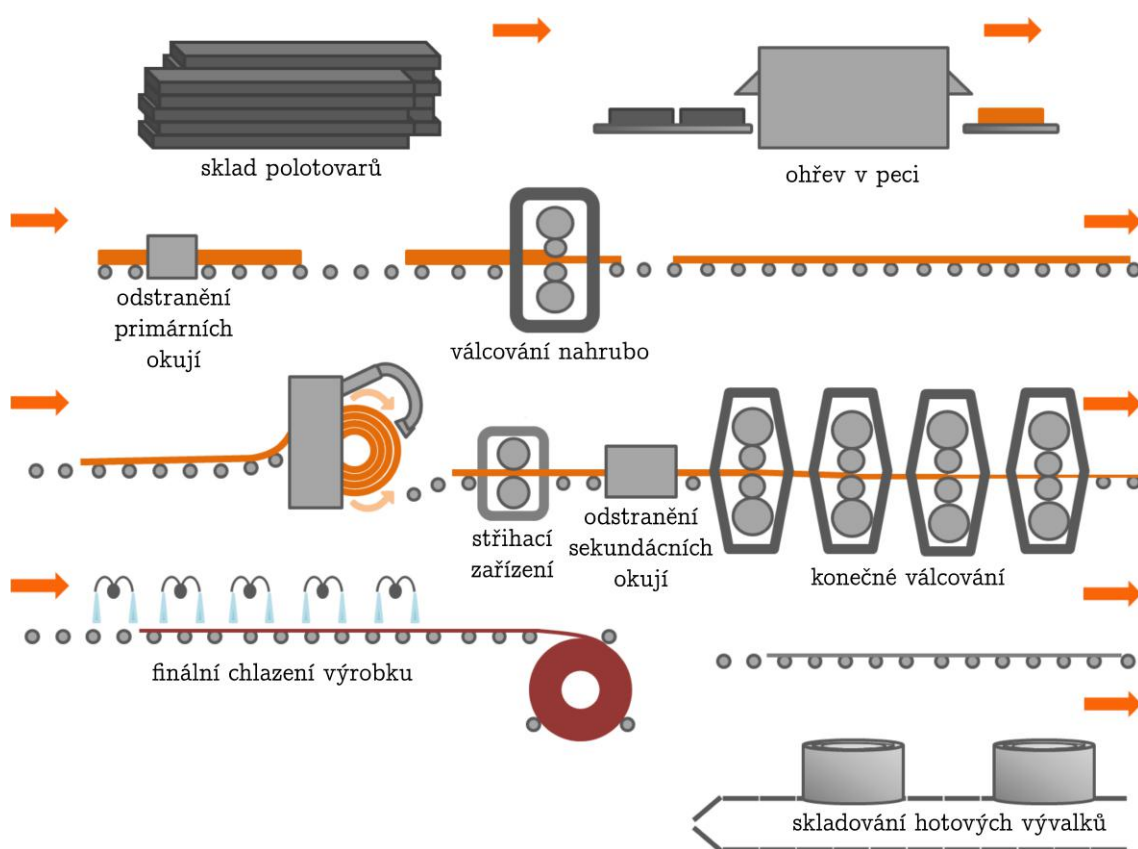
Válcování za tepla je jedna z možností zpracování oceli tvářením za tepla s využíváním její plasticity, tedy schopnosti přetvoření, aniž by došlo k porušení materiálu. Dochází k trvalé změně tvaru výchozího polotovaru v důsledku působení vnějších sil a materiál je deformován pod křivkou solidu. Výsledkem je jak změna tvaru polotovaru, tak změna fyzikálních charakteristik materiálu, která se projeví především změnou mikrostruktury rozvalku.

Při válcování za tepla je polotovar ohříván nad teplotu rekrystalizace materiálu. Pro čisté kovy se udává rekrystalizační teplota zhruba v hodnotě 35–45 % teploty tavení  $T_{tav}$  (v Kelvinech). V praxi jsou ovšem teploty tváření nad 60–70 %  $T_{tav}$  [2]. V provozních podmínkách se tato teplota u různých typů ocelí pohybuje od 900 do 1 200 °C.

Samotný proces válcování za tepla se realizuje na válcovací trati, která se skládá ze vzájemně propojeného systému strojů, dopravníků a manipulačních mechanismů. Válcovací tratě mají většinou od jedné až po dvanáct válcovacích stolic. Válcovací stolice je základní prvek válcovací trati, na kterém se realizuje samotné tváření. Důraz se klade především na tuhost a pevnost válců tak, aby docházelo k co nejmenšímu opotřebení.



Celý proces (viz obr. 1.1) začíná ohřátím ocelových polotovarů v plynových či elektrických pecích na požadovanou teplotu. Následuje pohyb polotovaru na předvalkové trati. Ohřátý polotovar prochází speciálním zařízením na odstraňování primárních (pecních) okujů a poté proběhne první válcování nahrubo na válcovací stoli. Tento produkt je na konci operace stočen do cívky tak, aby byla koncová část výrobku částí přední pro další zpracování. Následuje stříhání rozvalku na požadovanou délku a odstranění sekundárních (traťových) okujů. Rozvalek se poté válcuje na několika válcovacích stolicích do požadované tloušťky finálního výrobku a je zchlazen v chladicí sekci. Celý proces je zakončen navinutím finálního výrobku na cívku. [2, 47]



Obr. 1.1: Válcování plechů za tepla [47]

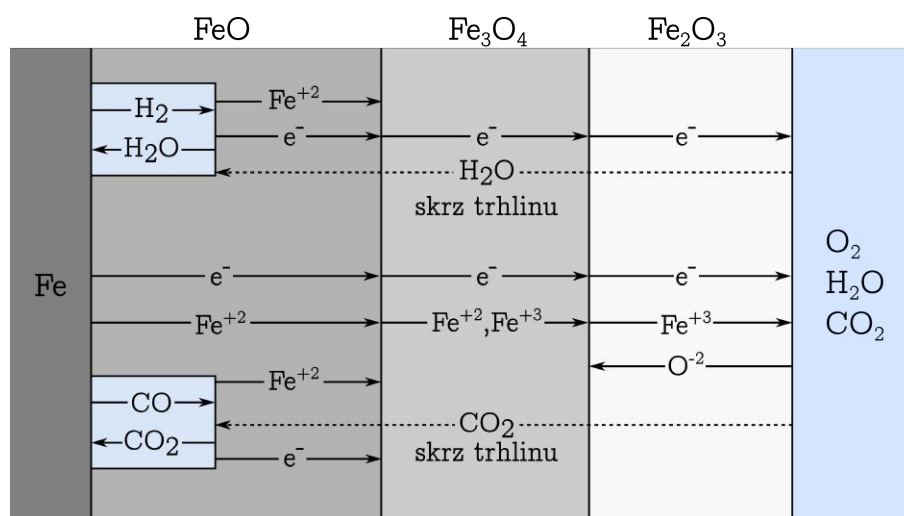
Válcování za tepla může být také integrováno ihned po plynulém odlévání. Při tomto procesu se mohou odlévat tenké odlitky již téměř požadovaného rozměru a zároveň zde odpadá nutnost dlouhého opětovného ohřevu v peci, což zvyšuje rentabilitu a efektivitu zpracování. Děje se tak především u odlévání tenkých bram, tzv. *thin-slab casting*. Tento typ výroby zažívá v současnosti rychlý rozvoj [42]. Dochází k plynulému odlévání bram s tloušťkami mezi 40 až 80 mm licí rychlostí od 4 do 20 metrů za minutu [32]. Tento postup ovšem vyžaduje sladění licí rychlosti polotovaru a válcovací rychlosti na stolicích, která může mnohdy dosáhnout až 5 m/s.

Tento nepoměr je někdy kompenzován tak, že pro jedno zařízení pro plynulé odlévání jsou přiřazeny dvě válcovací tratě.

## 1.2 | Vznik okují

Okuje je souhrnné označení oxidů, které vznikají za vysokých teplot a přítomnosti okolní atmosféry na povrchu zahřáté oceli. Jedná se především o oxidy železa. V menší míře se vyskytují i oxidy prvků, které tvoří příměsi oceli. Okuje mají většinou vrstevnatou povahu, kde jednotlivé vrstvy mají většinou převahu v konkrétním typu zastoupeného oxidu železa. Mezi hlavní oxidy železa, které se tvoří na povrchu zahřáté oceli, patří oxid železnatý ( $\text{FeO}$ , wüstit), oxid železnato-železitý ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , magnetit) a oxid železitý ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , hematit).

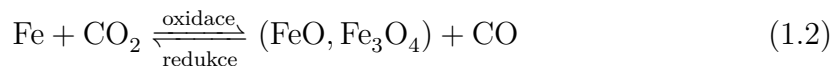
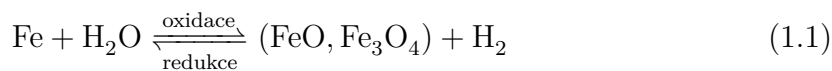
Proces vzniku okují je ilustrován na obr. 1.2. V okolní atmosféře se v hojné míře vyskytují molekuly  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{CO}_2$ , které způsobují samotnou oxidaci železa na povrchu. Dusík v atmosféře naopak oxidaci potlačuje. Proto je hojně využíván při experimentálních měřeních pro vznik okují a rychlost jejich vzniku, kdy je deska předem nahřátá na vysokou teplotu v dusíkové atmosféře a po jejím vystavení okolní atmosféře lze velmi rychle vidět nárůst okují na povrchu.



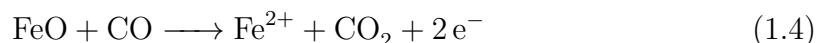
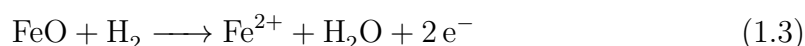
Obr. 1.2: Chemický vznik okují [55]

Termodynamicky se oxid vytvoří na kovovém povrchu, pokud je potenciál kyslíku v okolním prostředí větší než je potenciál parciálního tlaku kyslíku, který je v rovnováze s oxidem. Potenciál rovnováhy parciálního tlaku kyslíku, který je v rovnováze s oxidem, lze stanovit ze standardní Gibbsovy energie pro tvorbu oxidů. Tato Gibbsova energie je poháněcí silou oxidace železa. Pokud dochází k tvorbě různých oxidů na povrchu a každý se disociuje při jiném parciálním tlaku, pak oxidy bohatší na kyslík se většinou disociují rychleji než oxidy na kyslík chudší. [64]

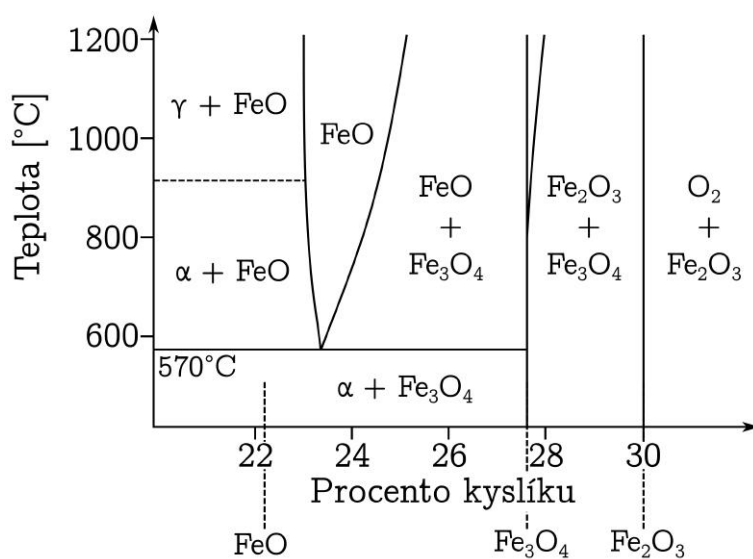
Molekuly  $\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{CO}_2$  v okolní atmosféře způsobují oxidaci železa na  $\text{FeO}$  a  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Tato reakce je vratná dle principu popsaném výše.



V pecích se vyskytuje většinou větší koncentrace těchto plynů jako produktů spalování. Touto reakcí vznikají na rozhraní okuje/ocel mezery ve kterých vzniká zvýšená koncentrace  $\text{H}_2$  a  $\text{CO}$ , které se přesouvají na vnitřní povrch okují a disociují  $\text{FeO}$  následujícími reakcemi:



na železné kationty  $\text{Fe}^{2+}$ . Kyslík z okolní atmosféry oxiduje železo přímo a železné kationty  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  difundují pomocí defektů v mřížce k povrchu okují a tvoří  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Díky těmto procesům se vyvíjí obvyklá struktura okují v podobě vrstev a s podobným složením.

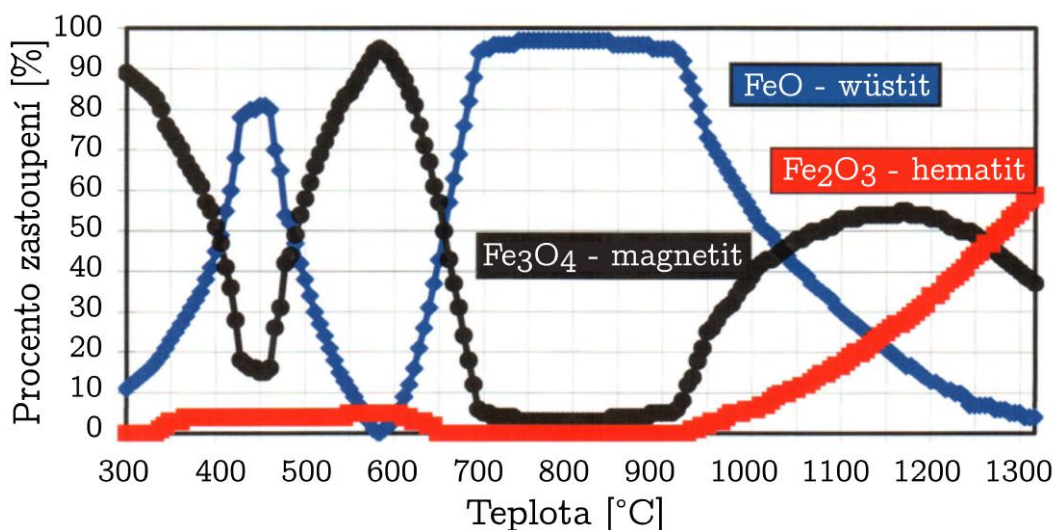


Obr. 1.3: Vznik okují v závislosti na teplotě a procentu kyslíku [40]

Tab. 1.1: Hmotnostní poměr kyslíku v okujích

Název	Oxid	hmotnostní % kyslíku	hmotnostní % železa
Wüstit	$\text{FeO}$	22,3	77,7
Magnetit	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	27,6	72,4
Hematit	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	30,1	69,9

Struktura okují je tedy z velké části ovlivněna koncentrací a tlakem kyslíku v okolní atmosféře. Je ovšem také závislá na teplotě okolí při samotné oxidaci. Tuto závislost ilustruje graf na obr. 1.3. Důležitou teplotou pro oxidaci je teplota 570 °C. Nad touto teplotou se již vyvíjí všechny základní typy oxidů železa a rychlost růstu okují se zvyšuje [29]. Tyto oxidy se vyvíjejí ve vrstvách i díky postupné klesající koncentraci kyslíku směrem k rozhraní okuje/ocel. Hmotnostní poměr kyslíku v jednotlivých typech oxidů uvádí tab. 1.1 a je naznačen i v obr. 1.3. Ze studie popsané v [68] vyplývá, že pro teploty v rozmezí 700 °C a 900 °C vzniká tenká vnější vrstva  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a tenká střední vrstva  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a velmi tlustá vrstva na rozhraní okuje/ocel z  $\text{FeO}$ . Z této studie vyplývá, že difuzní koeficient železa  $\text{Fe}^{2+}$  v této vrstvě je větší než u vrchních dvou vrstev a zároveň difuze kyslíku  $\text{O}^{2-}$  je velice pomalá. Tyto výsledky jsou detailně popsány i v [4], kde jsou uvedeny procentuální podíl tloušťky jednotlivých vrstev okují v závislosti na teplotě. Sám autor knihy [4] však upozorňuje, že se jedná spíše o orientační hodnoty, které ovšem dostatečně vystihují situaci pro velkou škálu případů. Tento vývoj je zachycen na obr. 1.4.



Obr. 1.4: Podíl tloušťky vrstvy okují v závislosti na teplotě dle [4]

## 1.3 | Parametry ovlivňující vznik okují

Mezi hlavní další parametry ovlivňující vznik okují patří především příměsi oceli, drsnost samotného povrchu a možnosti různého povlakování.

### 1.3.1 | Příměsi ocelí

Rozlišujeme široké spektrum typů ocelí. Každá ocel je charakterizována především podílem železa a uhlíku a z toho vyplývající strukturou vycházející ze soustavy

železo-uhlík. Dalšími parametry, které ovlivňují fyzikální a chemické vlastnosti dané konkrétní oceli, jsou příměsi. Příměsi mohou jak pozitivně, tak negativně, ovlivnit jakost a kvalitu vyráběné oceli. Příměsi lze obecně dělit na prvky doprovodné škodlivé (např.  $H_2$ ,  $N_2$ , P, S), doprovodné prospěšné (např. Al, Mn, Si) a přísadové (např. Ni, Cr, Ti, Mn, Al, Si, V, W, Co, Mo, Nb). Přísadové prvky jsou přidávány pro změnu mechanických či technologických vlastností, jedná se zde především o změny tvrdosti, obrobitelnosti, pevnosti a chemické odolnosti. [8, 51, 52]

Tyto příměsi ovlivňují velkou měrou i proces tvorby okují. Může docházet k potlačení oxidace na povrchu a k utlumení rychlosti oxidace železa, stejně tak některé prvky mohou znesnadnit odstraňování okují tím, že vytvoří s oxidy železa sloučeniny s velice houževnatou strukturou. Některé tyto vlastnosti lze odvodit přímo z Beketovy řady kovů (viz obr. 1.5), kde se orientujeme především na kovy, které jsou ušlechtlejší či méně ušlechtilé než železo. Tato sekce podrobně shrnuje pouze ty prvky, které hrají ve tvorbě okují významnou roli a kterým je třeba věnovat patřičnou pozornost.

s kyselinou → vodík + sůl											
s vodní parou → vodík + oxid											
Al	Ti	Mn	Zn	Cr	Fe	Cd	Co	Ni	Sn	Pb	H
$Al^{3+}$	$Ti^{2+}$	$Mn^{2+}$	$Zn^{2+}$	$Cr^{3+}$	$Fe^{2+}$	$Cd^{3+}$	$Co^{2+}$	$Ni^{2+}$	$Sn^{2+}$	$Pb^{2+}$	$H^+$
redukční účinky											

Obr. 1.5: Beketova řada kovů

## Křemík

Křemík patří mezi feritotvorné prvky. Netvoří v ocelích karbidy, je zcela rozpustěn v tuhém roztoku oceli, a tím zvyšuje mez pružnosti a mez kluzu. U většiny křemíkových ocelí jeho hmotnostní podíl nepřekračuje 2 % z důvodu následného snížení houževnatosti oceli [12]. Přidání křemíku způsobí významné zvýšení elektrického odporu oceli, což tuto ocel předurčuje pro použití v elektrotechnickém průmyslu. Pro tento účel se většinou válcují za tepla tzv. trafoplechy, které mají podíl křemíku od 0,3 až po 4,6 % [33].

Křemík způsobuje pomalejší růst okují vznikem oxidické vrstvy tvořené bohaté na křemík na rozhraní ocel/okuje. Za nižších teplot vzniká na rozhraní vrstva  $SiO_2$ , jež ztíží průnik železnatých iontů k povrchu [65].

Při vyšších teplotách, za kterých se realizuje válcování za tepla, a u ocelí s velkým podílem křemíku (nad 1 % podílu složení) ovšem vzniká na povrchu fáze  $Fe_2SiO_4$  (fayalite), který tvoří s FeO eutektickou směs s nízkým bodem tavení 1 173 °C. Tato eutektická směs se tvoří ve vrstvě, která se nachází nejbližší původnímu materiálu.

Tekutá fáze proniká jak do původního materiálu, tak do vrstvy oxidů nad ní [63]. Tento fakt způsobuje průnik likvidu mezi zrna FeO a do nerovností základního materiálu a znesnadňuje odkujitelnost celé vrstvy okují. Souvislou vrstvu těchto okují tvoří většinou až oceli s podílem křemíku nad 2 % [63]. Autoři Song, Suh, Bhadeshia v článku [63] uvádí pozorování, ve kterém konstatují, že tekutá složka FeO/Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> proniká mnohem snáze mezi zrna FeO, než do původního materiálu oceli a vysvětlují tento jev větší smáčivostí oxidů než původního materiálu.

## Hliník

Hliník, podobně jako křemík, snižuje rychlost vzniku oxidické vrstvy okují tím, že vytvoří na povrchu základního materiálu tenkou vrstvu, tvořenou především Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (viz obr. 1.5), která znesnadní pronikání železnatých iontů skrz [48]. Tato vrstva vzniká při teplotách od 500 °C do přibližně 700 °C a při vyšších teplotách se, podobně jako křemík, přetváří na spinelní, krystalizující v kubické soustavě, FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (hercynit) [26].

Oceli s příměsí hliníku se využívají především pro svou dobrou odolnost proti korozi a odolnost proti opotřebení. Bohužel při vyšším podílu hliníku v oceli se stává materiál křehkým, a tedy nepoužitelným. Aktuální trendy ovšem ilustruje článek [31], který popisuje fyzikální vlastnosti nové slitiny železa a hliníku, která tuto vlastnost částečně potlačuje a vytváří tak lehkou slitinu s vysokou tažností. Lze předpokládat, že v následujících letech se bude pozornost soustředit na tyto slitiny a to především z důvodu jejich nižší hustoty a tím i snížení provozních nákladů, např. pro automobilový průmysl.

## Chrom

Chrom se, podobně jako předchozí prvky, vyznačuje tvorbou vrstvy na povrchu oceli Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (viz obr. 1.5). Pro oceli s podílem vyšším než 1,25 % se rychlost oxidace snižuje. Při dostatečném podílu chromu se dokonce pro teploty nad 570 °C netvoří žádná vrstva FeO [26].

## Nikl

Nikl je ušlechtilější kov než železo (viz obr. 1.5), což způsobí na rozhraní okuje/ocel oxidaci železa na FeO [26]. Tato oxidace ovšem zvyšuje podíl niklu v krajní vrstvě a díky nízkému difuznímu koeficientu niklu v železe nedochází k rychlé difuzi niklu zpět do původního materiálu. Zvýšení koncentrace niklu na rozhraní pak může zamezit další oxidaci železa a snížit následnou rychlost tvorby okují [1].

## Molybden

Molybden je, stejně jako nikl, ušlechtlejší kov než železo. Při nízkých koncentracích molybdenu s příměsí křemíku v oceli může vzniknout velice hladký povrch, který zdárně potlačuje vznik okují [66].

### 1.3.2 | Povlakování

Další velice účinnou metodou, jak efektivně potlačit rychlost růstu okují, je možnost povlakování povrchu a tím zabránění kontaktu ohřívaného materiálu s okolní atmosférou.

Povlaky můžeme dělit na dvě skupiny, dle reaktivity s původním materiálem, na pasivní a aktivní typy. Pasivní typ povlaku zabraňuje průniku kyslíku k samotnému povrchu. Aktivní typ redukuje proces difuze kationtů  $\text{Fe}^{2+}$  tím, že zaplňuje vakance v mřížce kovy alkalických zemin, především pak Ca a Mg. [59]

Součástí povlaků bývají často i prvky jako křemík a hliník, tzv. semi-aktivními prvky, a to především z důvodů popsaných výše a také chemicky aktivní prvky jako například sodík, draslík či bor.

Úkolem povlaků je nejen snížit rychlost růstu okují, a tedy zvýšit produktivitu, ale i zlepšit i odkujitelnost těchto vrstev, a tím zvýšit kvalitu. Studie [59] uvádí, že pro středně až vysoko uhlíkové oceli představují povlaky s podílem křemíku jednu z nejefektivnějších metod potlačení tvorby okují. Zároveň ale studie uvádí, že při vysokých teplotách nad 1 173 °C se vyvíjí fayalit a odstranění už tak vzniklých okují je o to náročnější. Tento příklad ukazuje, že je povlakování vhodné jen v určitých případech. Konkrétně tyto povlaky se doporučují jen pro teploty 800 až 900 °C.

## 1.4 | Modely růstu okují

Vzhledem k velké variabilitě v teplotách, příměsích, složení okolní atmosféry a drsnosti povrchu samotné oceli se vyvíjí každá vrstva oxidů jinak rychle a je tedy velice těžké komplexně popsat růst vrstvy okují za použití všech těchto parametrů. Používá se proto jednoduchých popisných rovnic s růstovými koeficienty, které závisí na daných podmínkách a určují se většinou až experimentálně.

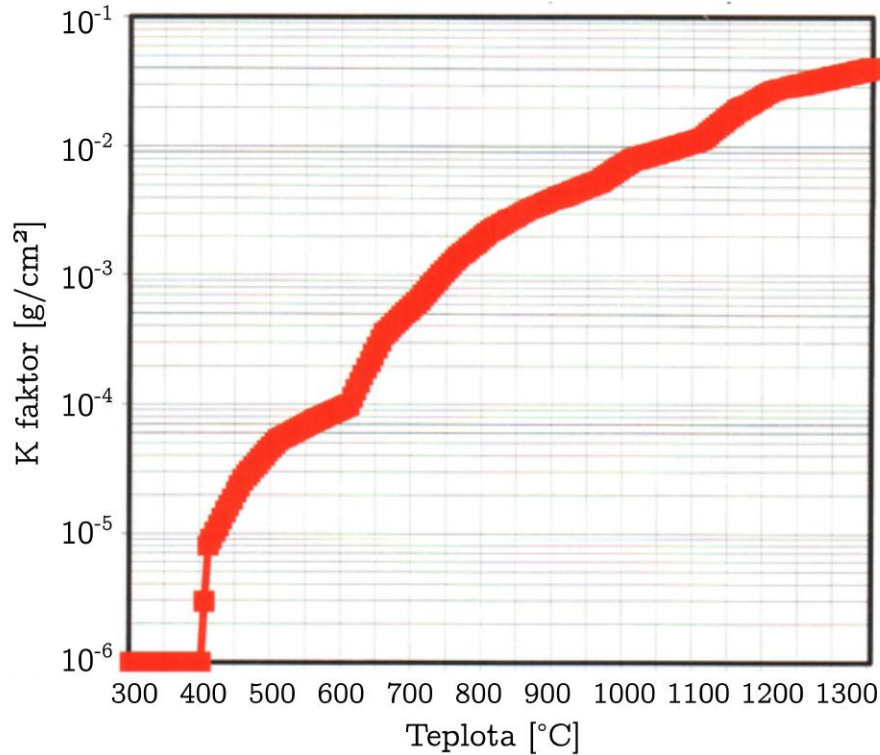
Základní a nejjednodušší rovnice pro modelování průměrné výšky okují v závislosti na čase je parabolická rovnice

$$z_p(t) = k(T)\sqrt{t} \quad (1.5)$$

kde parametr růstu  $k(T)$  je funkcí teploty [4] a  $t$  je čas oxidace. Parametr  $k(T)$  je možné odhadnout měřením pro různé teploty a různé časy oxidace. Hodnota



parametru  $k(T)$  závisí také na vytvářeném typu okují a je tedy specifická pro každý typ oceli a na drsnosti povrchu oceli. Největší citlivost parametru  $k(T)$  se ovšem uvádí vůči teplotě, a proto se experimenty soustředí především na určení tohoto parametru pro různé teploty. Závislost na teplotě udává například [4] a je zobrazena na obr. 1.6, kde ji autor vyjádřil přírůstkem gramů okují na  $\text{cm}^2$  plochy.



Obr. 1.6: Závislost parametru růstu okují  $k(T)$  na teplotě [4]

Složitější model předpokládá, že oxidace oceli má zpočátku lineární charakter nárůstu okují a že rychlost počáteční oxidace povrchu závisí více na obsahu kyslíku v okolní atmosféře než na teplotě materiálu. V počáteční fázi se tvoří FeO jako hladká vrstva jednotné tloušťky na povrchu materiálu a poté dle preference růstu zrn krystalizuje do konečné struktury. Po této počáteční fázi se růst okují zpomalí a přechází v parabolickou charakteristiku, která závisí opět především na teplotě materiálu, méně již na složení okolní atmosféry. V této fázi se ve větší míře začíná tvořit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na povrchu původní vrstvy okují. [23]

Článek [63] uvádí rovnici růstu okují pro křemičité oceli:

$$z_p \frac{dz_p}{dt} = \frac{D_{Si}(\bar{x} - x^{so})^2}{2(x^{os} - x^{so})(x^{os} - \bar{x})} \quad (1.6)$$

kde  $x^{so}$  je koncentrace v oceli, která je v rovnováze s oxidem,  $x^{os}$  je příslušná koncentrace oxidu, která je v rovnováze s ocelí,  $\bar{x}$  je průměrná koncentrace křemíku v oceli,  $D_{Si}$  je difuzivita křemíku v austenitickém substrátu. Výraz napravo v diferenciální



rovnici představuje rozepsaný parametr růstu  $k$  popsany v rovnici 1.5 . Řešením této diferenciální rovnice je totiž opět model

$$z_p = \sqrt{\frac{D_{Si}(\bar{x} - x^{so})^2}{2(x^{os} - x^{so})(x^{os} - \bar{x})}} \sqrt{t}. \quad (1.7)$$

Koeficienty v této rovnici lze odhadnout pomocí databází v softwaru ThermoCalc nebo přímo odhadnout parametr růstu  $k$  měřením. [63] Vzhledem k dispozici pouze několika typů oceli bude parametr růstu  $k$  odhadnut pomocí měření.

## 1.5 | Fyzikální vlastnosti okují

Mezi základní přehled o vlastnostech okují patří i jejich fyzikální vlastnosti. Tyto vlastnosti se měří poměrně obtížně a v literatuře mnoho konkrétních hodnot nenalezeme. Vzhledem k široké paletě složení ocelí a z nich vznikajících okují, lze pozorovat i široké intervaly odhadů hodnot fyzikálních vlastností. Tyto vlastnosti se buď přisuzují okujím jako celistvé vrstvě nebo jednotlivým vrstvám v jejich struktuře. Tab. 1.2 uvádí používané hodnoty, pro případ, kdy okuje modelujeme jako homogenní vrstvu. Tab. 1.3 uvádí používané hodnoty, pro případ, kdy okuje modelujeme jako vrstevnatou strukturu a každé struktuře přiřazujeme různé fyzikální vlastnosti. Obě tabulky pak uvádějí u každého údaje použitý zdroj.

Tab. 1.2: Vlastnosti okují jako homogenní vrstvy

Parametr	Okuje	Ref.
Hustota [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	5 700	[37]
Měrná tepelná kapacita [ $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$674,959 + 0,297T - 4,367 \cdot 10^{-5}T$ pro $T \in 600\text{--}1\,100\text{ }^{\circ}\text{C}$	[37]
Tepelná vodivost [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$1 - 7,833 \cdot 10^{-4}T$ pro $T \in 600\text{--}1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$	[37]
Youngův modul [GPa]	$240 \cdot 10^9(1 - 4,7 \cdot 10^{-4}(T - 25))$	[37, 46]
Poissonova konstanta [-]	0,3	[60]
Tepelná roztažnost [ $\text{K}^{-1}$ ]	$8 \cdot 10^{-6}$	[37]
Poissonova konstanta [-]	0,3	[37]

Z výsledků je vidět, že některé údaje se mohou podstatně lišit v závislosti na citovaném zdroji, jako například hustota FeO v tab. 1.3. Fyzikální vlastnosti se zároveň pro jednoduchost považují za konstantní nebo pouze závislé na teplotě  $T$ .

Tab. 1.3: Vlastnosti okují dle typu oxidu

Parametr	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Ref.
Hustota [kg·m <sup>-3</sup> ]	5 670	5 240	5 180	[25]
	5 900	5 200	5 100	[36]
Tepelná roztažnost [K <sup>-1</sup> ]	10–15 · 10 <sup>-6</sup>	-	-	[25]
	-	8 · 10 <sup>-6</sup>	9,6 · 10 <sup>-6</sup>	[36]
Teplota tavení [°C]	1 370	1 560	1 550	[36]
Youngův modul [GPa]	$152 \left(1 - \frac{T-300}{5476}\right)$	$210 \left(1 - \frac{T-300}{9200}\right)$	-	[36]
Modul pružnosti ve smyku [GPa]	55,7	88,2	-	[36]
Pevnost [MPa]	0,4	10	4	[25]
Poissonova konstanta [-]	0,36	0,19	-	[36]
Tvrdość [HV]	270–350	-	420–500	[25]
Tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	2,7–3,2	0,5–3,5	0,5–3,5	[25]
Teplotní vodivost [10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]	0,7	0,2–3	0,2–3	[25]
				[25]
Měrná tepelná kapacita [J·mol <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	58	150	200	[25]
				[25]

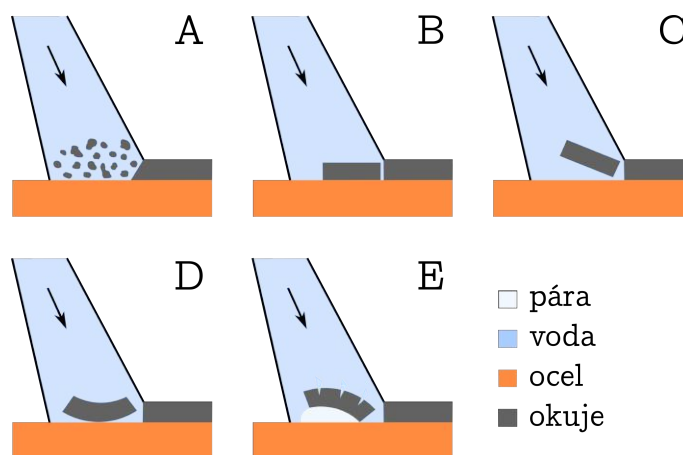


## Hydraulické odstraňování okují

### 2.1 | Fyzikální principy odstranění okují

Při hydraulickém odstraňování okují dochází ke kombinaci několika fyzikálních principů. Tyto principy jsou schematicky znázorněny na obr. 2.1. Jedná se o

- (A) porušování a rozměňňování okují vlivem mechanického působení vodního paprsku,
- (B) vliv rozdílné tepelné roztažnosti okují a základního materiálu, který působí další odtrhávání vrstvy okují od základního materiálu
- (C) působení smykového napětí mezi materiálem a okujemi, které okuje dále oddělí od základního materiálu,
- (D) vliv samotného teplotního gradientu v okujích, který přispívá k odlupování,
- (E) vypařování vody v puklinách, tzv. teorie parní exploze. [56]



Obr. 2.1: Fyzikální principy odstranění okují [56]

Tyto principy jsou založeny buď na mechanickém působení paprsku nebo na teplotním gradientu. V literatuře se dočteme poměrně protichůdné názory na podíl jednotlivých principů na efektivitě odstraňování okují. Například zdroj [4] popisuje odstraňování okují s převahou mechanické složky a uvádí, že teplotní gradient způsobuje v samotném procesu jen 10 % efektivitu. Naopak v Laboratoři přenosu tepla

a proudění předpokládáme spíše společné působení obou složek.

Vynecháním mechanické složky vodního paprsku nedochází k efektivnímu odstranění okují. Argumentem může být použití trysek s malým tlakem, který snižuje podíl mechanické složky vůči složce tepelné. Naopak použitím trysek s velkým průtokem, a tudíž velkou mechanickou složkou, na nenahřátém zoxidovaném povrchu také nedochází k efektivnímu odstranění [56]. Tento argument ovšem nemusí být validní, neboť okuje mají při pokojové teplotě na nenahřátém povrchu rozdílné mechanické vlastnosti než v případě jejich umístění ve vyhřáté peci. Problematika je i přes to poměrně komplexní a vyžaduje zcela jistě spojení obou fyzikálních přístupů.

## 2.2 | Konstrukce trysek

K odstraňování okují se nejčastěji používají vysokotlaké trysky s plochým vodním paprskem [A13]. Dále se v omezené míře používají i trysky s válcovým vodním paprskem nebo trysky s oscilujícím vodním paprskem [A12]. Trysky mohou být upevněny staticky, nebo mohou být upevněny na rotační hlavě a rotovat kolmo vůči odkujovanému povrchu. Trysky s oscilujícím vodním paprskem a trysky s válcovým paprskem mají ovšem problémy v oblasti homogenity odstraňování okují a proto se dále text bude primárně zaměřovat na technické řešení s tryskami s plochým vodním paprskem.

Každá konstrukce trysky s plochým vodním paprskem se skládá z několika základních částí, které jsou uceleně zobrazeny na obr. 2.2. Jedná se o tělo samotné



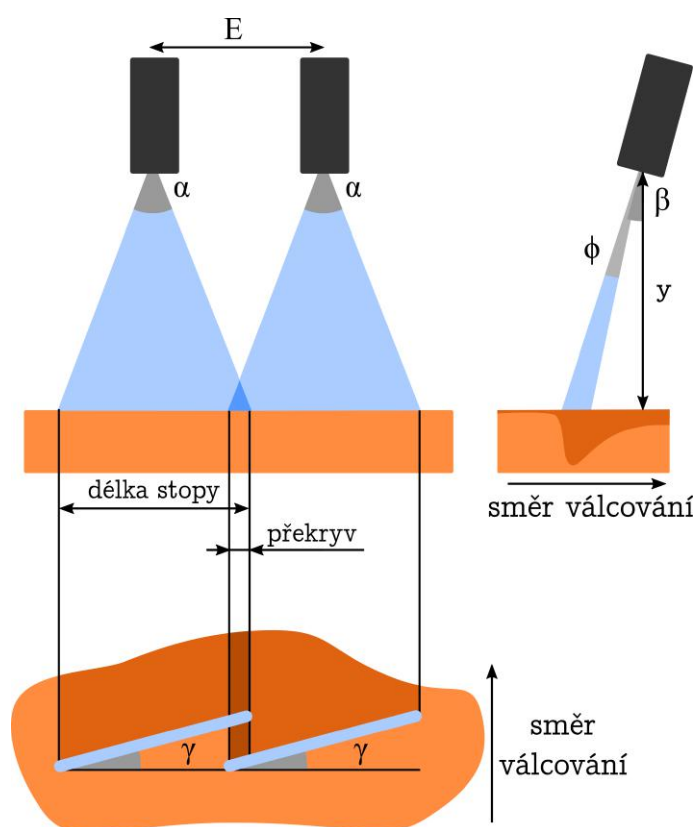
Obr. 2.2: Konstrukce trysky [17]

trysky, stabilizátor vodního proudu, upevňující držák, pojistný měděný kroužek a pojistnou matici. V těle trysky se nachází karbidová vložka, která určuje základní charakteristiky vycházejícího vodního proudu, jakými je například úhel rozstříku,

rovnoměrnost vodního proudu a podobně. Detaily designu každé konstrukce se dále liší dle příslušného výrobce.

## 2.3 | Hlavní parametry nastavení trysek

U každé konfigurace rozlišujeme parametry nastavení trysek, které můžeme dále dělit na parametry trysek samotných, daných fixně výrobou, a parametry vzájemného nastavení trysek a jejich nastavení vůči držákům.



Obr. 2.3: Schéma nastavení trysek

### 2.3.1 | Fixní parametry trysek

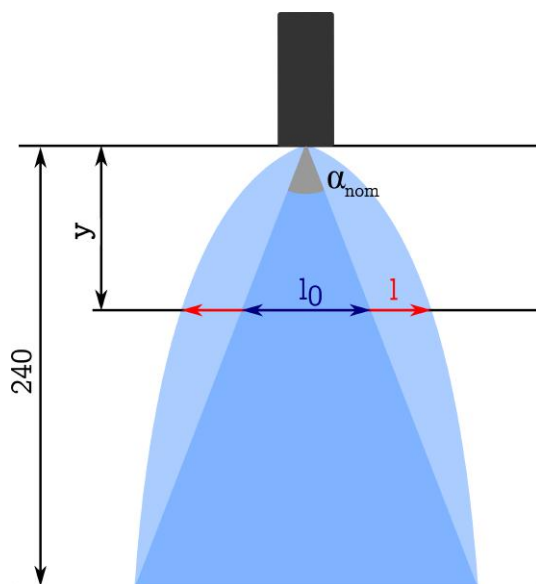
Parametry trysek jsou parametry pevně určené designem a výrobou daného typu trysky. Mezi hlavní parametry patří úhel rozstříku  $\alpha$ , úhel hloubky paprsku  $\phi$  a hodnota průtoku tryskou při daném referenčním tlaku. Díky tomu lze jednoduše trysky mezi sebou porovnávat v jejich energetické náročnosti. Výrobci obvykle dodávají trysky ve výrobních řadách, kde zákazník může nezávisle zvolit pro daný průtok několik variant úhlu rozstříku. Některé z těchto parametrů jsou zobrazeny na ilustračním obrázku 2.3.

## Úhel rozstříku $\alpha$

Úhel rozstříku  $\alpha$  je jednou ze základních charakteristik každé trysky. Úhly rozstříku se většinou pohybují v rozmezí od 15 do 50 stupňů. Úhel  $\alpha$  je dán konstrukcí trysky a je tedy fixní. Od tohoto parametru se dále odvíjí šířka stopy trysky v dané výšce od ostříkovaného povrchu a tedy i podmínka na jednotlivé maximální rozteče mezi tryskami, kde ještě dochází k překryvu vodních paprsků.

Při zjednodušeném výpočtu pro šířku stopy  $l_0$  ve výšce  $y$  a při nominálním úhlu rozstříku  $\alpha_{nom}$ , kdy paprsek dopadá kolmo na ostříkovaný povrch, lze použít jednoduchého vzorce:

$$l_0 = 2y \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_{nom}}{2} \right) \quad (2.1)$$



Obr. 2.4: Schéma úhlu – Lechler [61]

Tvar vodního paprsku má ovšem spíše parabolický charakter, který je naznačen v obrázku 2.4, proto pro přesný popis závislosti šířky stopy  $l$  je použito vzorců, zahrnujících jak úhel rozstříku  $\alpha$  a výšku  $y$ , tak použitý tlak  $p$ . Ke komplexnímu popisu se pro každou výšku  $x$  zavádí výpočtový úhel rozstříku  $\alpha$  následujícím způsobem

$$\alpha = \alpha_{nom} + \left[ (k_1 p + k_2) y^3 + (k_3 p + k_4) y^2 + (k_5 p + k_6) y + (k_7 p + k_8) \right] [61],$$

kde  $k_i$  jsou příslušné číselné koeficienty, které se získávají pro každý typ trysky pomocí měření. Pro šířku stopy se poté použije předcházející vzorec, ve kterém je parametr  $\alpha_{nom}$  nahrazen parametrem  $\alpha$ .

Výpočty prezentované v této práci se omezují pouze na popis problematiky pomocí nominálního úhlu  $\alpha_{nom}$ , který je dále označován jako  $\alpha$ , a to především z důvodu nároků na určení koeficientů  $k_i$ . Tento model je dostačující již z toho důvodu, že mnoho výrobců uvádí výrobní toleranci pro úhel rozstříku až  $\pm 5^\circ$ .

### Úhel hloubky paprsku $\phi$

Úhel hloubky paprsku  $\phi$  určuje hloubku stopy vodního paprsku ve směru válcování. Tento úhel nebývá uveden v katalogu trysek, ale pohybuje se většinou mezi 1 až 2°. Je to parametr závislý na typu trysky a vstupním tlaku. U odkujovacích trysek požadujeme velmi úzký a soustředěný paprsek, proto platí, že čím menší úhel  $\phi$  tryska má, tím koncentrovanější bude energie vodního paprsku a tím efektivnější se očekává jeho výkon. S hloubkou vodního paprsku souvisí i délka chlazeného povrchu, ze kterého okuje odstraňujeme, přičemž opět platí, že čím užší paprsek bude, tím kratší dobu bude válcovaný polotovar chlazen.

### Průtok tryskou při referenčním tlaku $Q_{ref}$

Každá tryska má v katalogu přiřazen referenční průtok vody tryskou při referenčním tlaku. Tyto referenční tlaky jednotlivých výrobců se pohybují od 10 do 40 MPa a příslušný průtok se udává v l/min. Hodnoty se pohybují většinou od 10 l/min až po 200 l/min. Trysky s větším průtokem s sebou samozřejmě nesou větší kinetickou energii a jsou tedy efektivnější pro odstraňování okují z mechanického hlediska.

## 2.3.2 | Parametry nastavení konfigurace

Mezi parametry nastavení konfigurace řadíme především úhel náklonu trysky  $\beta$ , úhel natočení trysky  $\gamma$ , výšku trysky nad povrchem  $y$ , rozteč trysek  $E$ , pracovní tlak a průtok tryskou.

### Úhel náklonu trysky $\beta$

Úhel náklonu trysky  $\beta$  pomáhá směřovat proud vody proti pohybu válcování a přispívá tedy ke směrovému odlupování okují a jejich lepšímu sběru a odvodu z povrchu společně s vodou a vodními parami.

### Úhel natočení trysky $\gamma$

Úhel natočení trysky  $\gamma$  přispívá k lepšímu směrovému odlupování okují a posunuje okuje směrem ven ze středu odkujovaného povrchu. Tento úhel se pohybuje v průmyslové praxi od 0 až po 15°. Má velký vliv na homogenitu intenzity chlazení po šířce, neboť prodlužuje významně dobu chlazení v oblasti překryvu. U menších úhlů naopak může docházet ke srážce vodních paprsků a ke snížení abrazivního efektu paprsku. Tato problematika byla již experimentálně ověřena a publikována v článcích [A2], [A3] a [A6] v impaktovaném časopise. Plně tento efekt však nebyl zatím nikde popsán a věnuje se mu proto dizertační práce v kapitole 4.5.



## Pracovní tlak a průtok tryskou

Pracovní tlak trysky je primárně dán možnostmi čerpadel, která trysku nebo systém trysek napájí. V Laboratoři přenosu tepla a proudění je schopno čerpadlo dosáhnout až 45 MPa a průtoku až 120 l/min. Přepočít průtoku tryskou při experimentálně nastaveném tlaku  $p_{exp}$  se provádí dle vzorce 2.2 z referenčních katalogových hodnot průtoku  $Q_{ref}$  a tlaku  $p_{ref}$ .

$$Q_{exp} = \sqrt{\frac{p_{exp}}{p_{ref}}} Q_{ref} \quad (2.2)$$

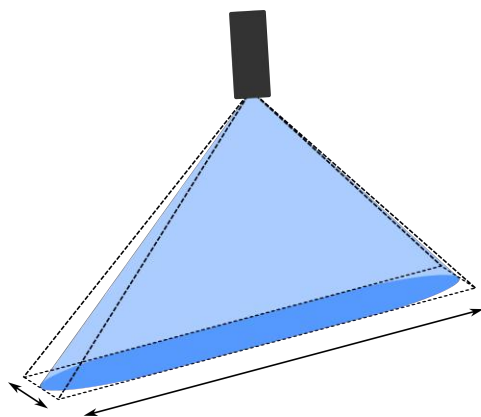
Provozní a experimentální tlaky pro odkuvování se pohybují od 10 MPa až po výsoce výkonných 40 MPa. Při vyšších tlacích je přitom třeba zohlednit i doporučené maximální tlakové zatížení trysky. Zároveň je třeba kontrolovat příslušný průtok tryskou/tryskami, který nesmí překročit maximální průtok soustavou.

## 2.4 | Veličiny odvozené z nastavení trysky

### Plocha stopy trysky

Základní odvozenou veličinou z nastavení trysky je plocha stopy samotné trysky (obr. 2.5). Zjednodušeně lze plochu  $A_0$ , při konfiguraci kdy paprsek dopadá kolmo na ostříkávaný povrch, vypočítat odvozením ze vzorce 2.1 jako

$$A_0 = ld = 4y^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right). \quad (2.3)$$



Obr. 2.5: Schéma stopy trysky

Pro nenulový úhel náklonu trysky  $\beta$  se vzorec pozmění na

$$A_0 = ld = 4y^2 \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right)}{\cos^2(\beta)}. \quad (2.4)$$

### Rychlost proudění

Rychlost proudění se zjednodušeně odvodí z Bernoulliho rovnice, kdy se předpokládá, že veškerý přetlak  $p$  se přemění na kinetickou energii kapaliny s konstantní hustotou  $\rho$  a s rychlostí  $v_0$ .

$$p = \frac{1}{2}\rho v_0^2$$

Rychlost proudění kapaliny je tedy proporcionální druhé odmocnině pracovního tlaku:

$$v_0 \propto \frac{\sqrt{2p}}{\sqrt{\rho}}. [62] \quad (2.5)$$

Toto odvození ovšem nadhodnocuje rychlost proudění a to především tím, že nezapočítává odpor prostředí, které na kapky vody působí. Struktura proudu je navíc velmi složitá a dochází k různé velikosti odporu prostředí na různě velké kapky.

### Impaktní tlak

Impaktní tlak je jednou ze základních charakteristik, která určuje efektivitu samotného odstraňování okují. Tlakové rozložení lze spočítat pomocí diferenciálu  $\frac{v dQ_{exp}}{dA_0}$ . Protože však neznáme přesné rozložení diferenciálu průtoku  $dQ_{exp}$  a to ať už statické, tak dynamické, omezujeme se pouze na určení průměrného impaktního tlaku  $p_{impakt}$  na ploše stopy vodního paprsku  $A_0$ .

Kombinací vzorců 2.4 a 2.5 dostaneme vyjádření

$$p_{impakt} = \frac{vQ_{exp}}{A_0} = \frac{K^n}{4} \frac{Q_{exp}\sqrt{p}\cos^2(\beta)}{y^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \operatorname{tg}\left(\frac{\phi}{2}\right)}, [62]$$

kde konstanta  $K^n$  v sobě zahrnuje konstanty týkající se hustoty kapaliny a zohledňuje odpor prostředí.

Předpokládejme, že parametry  $\alpha$ ,  $\phi$  a  $\beta$  se nemění, pak

$$p_{impakt} \propto \frac{p}{y^2}$$

Alternativou tohoto vzorce dle [45] je vztah

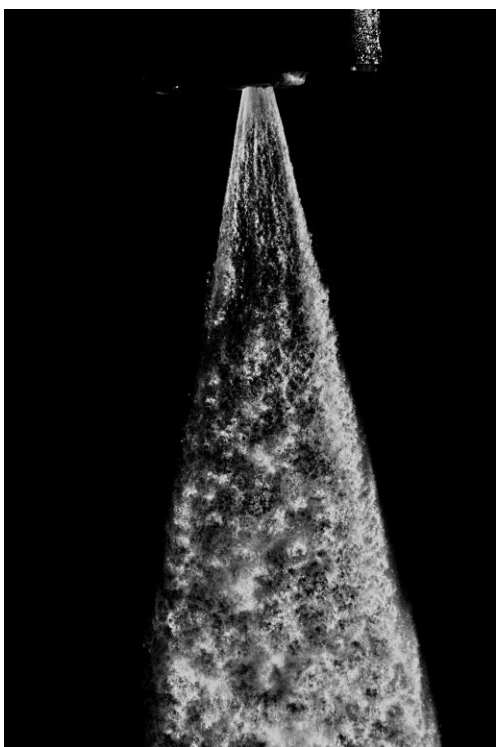
$$p_{impakt} = \frac{K'Q\sqrt{p}}{y^x \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right)}.$$



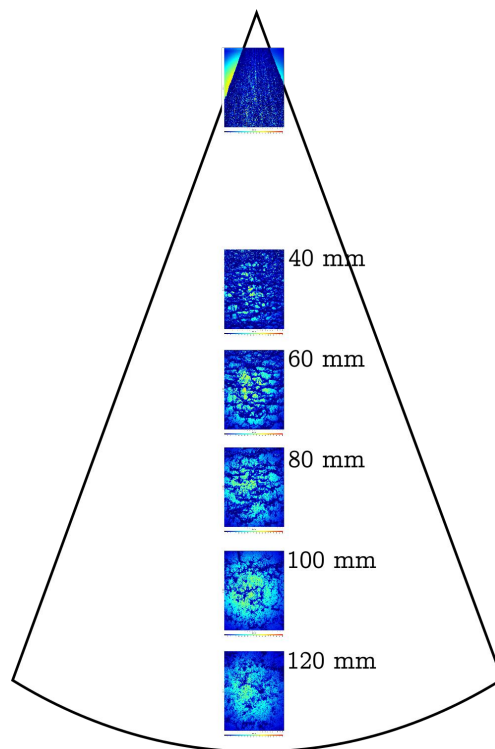
## Typy experimentů

### 3.1 | Focení struktury paprsku

Focení struktury paprsku lze provádět více způsoby. Jedním z nich, kterým byly v minulých letech v Laboratoři přenosu tepla a proudění foceny celé struktury vodního paprsku, je focení pomocí prosvícení paprsku ze strany velmi krátkým laserovým pulzem. Výsledky této metody jsou zobrazeny na obr. 3.1. Metoda vyfotí paprsek jako celek, je ovšem třeba poměrně velkého dodatečného zpracování obrazu a jedná se tedy spíše o demonstrační metodu.



Obr. 3.1: Metoda prosvícení laserem

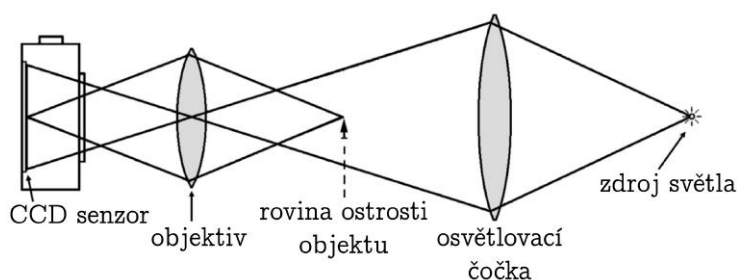


Obr. 3.2: Stínografická metoda

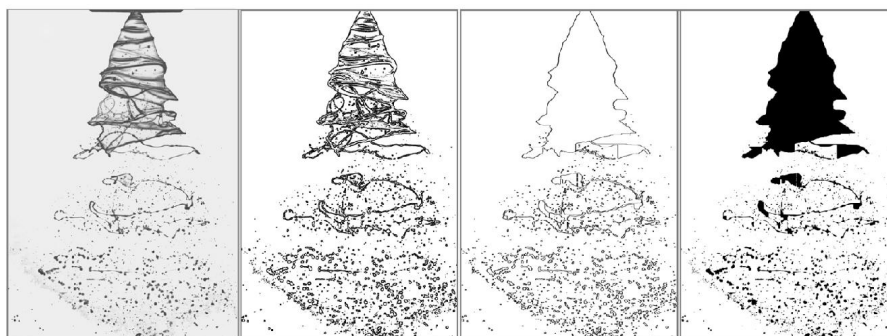
Druhým způsobem focení paprsku je stínografická metoda, zobrazená na obr. 3.2. Tato metoda využívá prosvětlování vodního paprsku zezadu intenzivními záblesky laserového světla s krátkou dobou pulzu (5ns) s využitím optického difusoru. Princip

je znázorněn na obr. 3.3. Článek [10] ilustruje, jak lze tuto metodu použít pro široké spektrum typů kapek a proudění (obr. 3.5). Nejčastěji se ovšem tato metoda používá pro analýzu struktury vodního paprsku u malých průtoků.

Jedním z cílů dizertační práce je aplikace této metody na oblast odkujovacích trysek a analýzu struktury jejich paprsku. Tyto výsledky jsou zpracovány v kapitole 4.3.



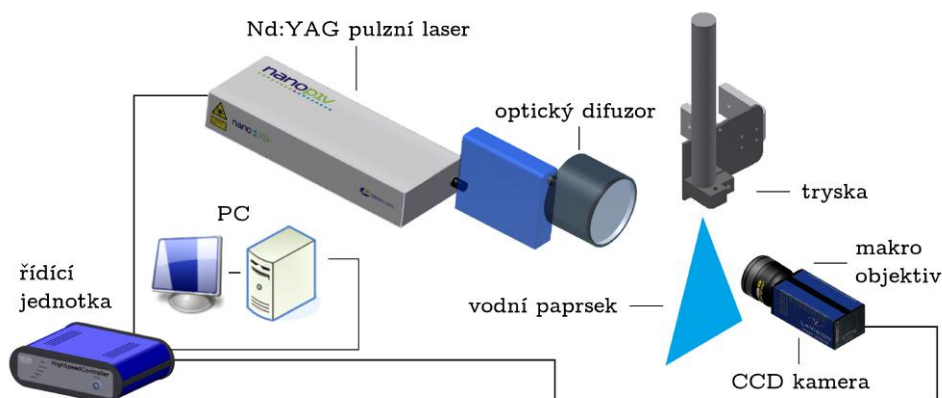
Obr. 3.3: Princip pořizování fotografií sténografickou metodou [10]



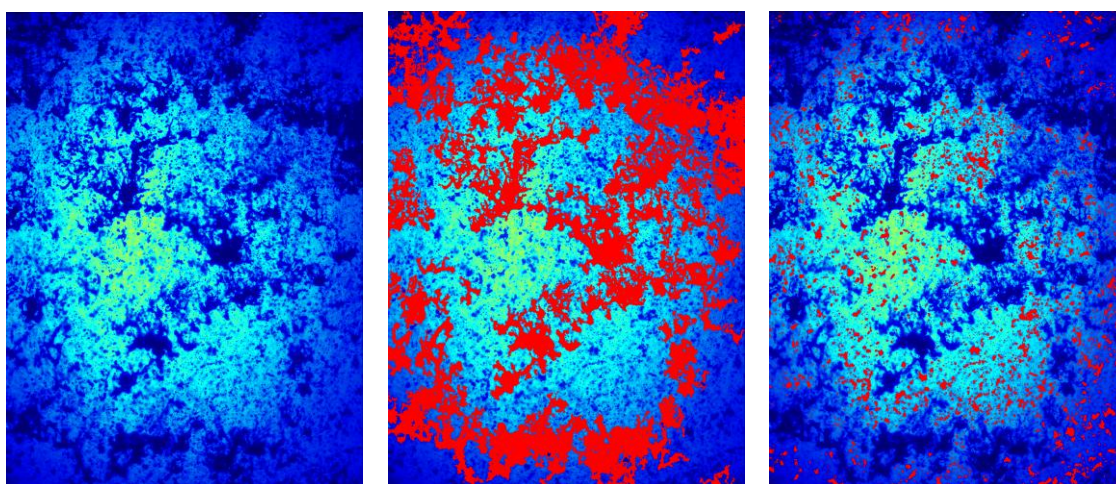
Obr. 3.4: Princip zpracování fotografií sténografickou metodou dle článku [10]

### Současný stav aplikace metody v praxi

Metoda focení struktury vodního paprsku u odkujovacích trysek pomocí sténografie nebyla zatím nikde rozsáhle publikována. První experimenty byly prováděny v Ústavu geoniky AV ČR v roce 2015 na tryskách dodaných Laboratoří přenosu tepla a proudění. Struktura byla pořízena na měřicím zařízení, které je schematicky popsáno na obr. 3.5. Rozměr focené oblasti byl u prvotních fotografií  $15,9 \times 11,9$  mm, později pak  $21 \times 16$  mm. Pro každou oblast byla pořízena jedna fotografie. Data z focení struktury paprsku byla dříve analyzována v programu NIS Elements AR v. 3.0, později byl pro tento účel vyvinut speciální skript v Matlabu. Na každém snímku byly identifikovány drobné kapky a větší shluky vody (viz obr. 3.6) a tato struktura byla analyzována v závislosti na vzdálenosti fotografované oblasti od čela trysky. Tyto poznatky byly pak shrnuty v článku [A4].



Obr. 3.5: Princip pořizování fotografií stínografickou metodou [A4]



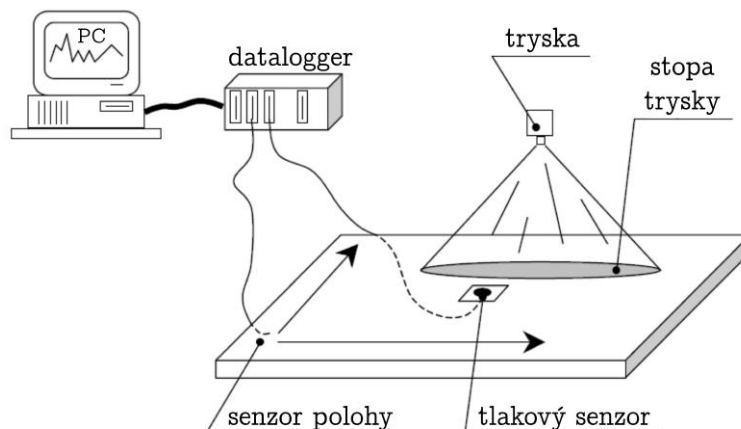
Obr. 3.6: Paprsek focený prosvícením z laseru, identifikace velkých shluků vody a identifikace kapek v obraze [A4]

### 3.2 | Měření impaktních tlaků

Měření impaktního tlaku je jedním ze základních standardních typů měření. Provádí se pomocí tlakového senzoru o měřicím rozsahu do 10 MPa, novější senzor pak až do 40 MPa. Schéma měřicí aparatury je zakresleno na obr. 3.7. Zakalená deska o tvrdosti 800 HV se pohybuje ve vodorovném směru v souřadné soustavě X/Y. Uprostřed desky se nachází otvor, pod kterým je umístěn tlakový senzor, který snímá aktuální hodnotu tlaku. Datalogger, zařízení pro sběr dat, shromažďuje informace o aktuálním tlaku a aktuálně dané poloze desky a předává tyto data dál do počítače.

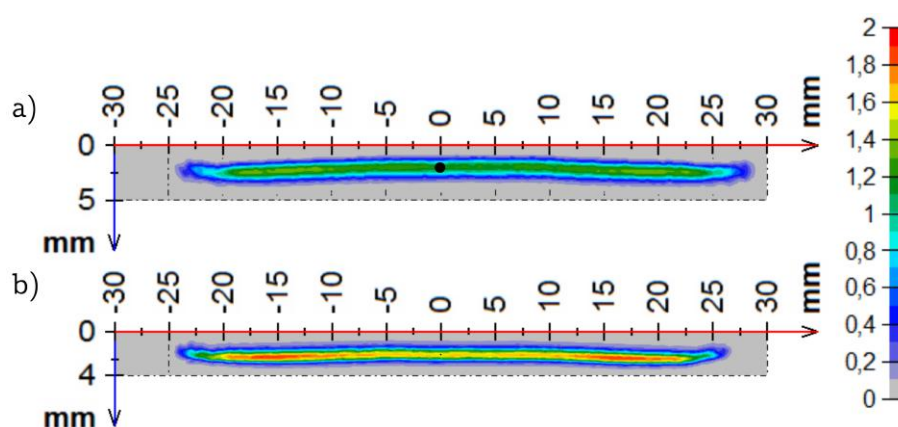
Toto měření je, v porovnání s ostatními typy měření, jednoduché na princip a sestavení. Pro složitější konfigurace však může měření přesáhnout hravě i 30 minut, což se samozřejmě při příslušném průtoku tryskou odrazí i na spotřebě vody a energie pro čerpadlo.

Starší měření, která byla prováděna touto aparaturou na Laboratoři přenosu



Obr. 3.7: Měřicí aparatura pro měření impaktního tlaku

tepla a proudění, byla měřena pro velikost senzoru o průměru 1 mm. Průměr 1 mm je ovšem méně vhodný pro měření trysek, jejichž hloubka paprsku se pohybuje od 1,5 až po 4 mm. Tento průměr byl tedy v roce 2015 v rámci realizace experimentů pro dizertační práci zmenšen na průměr 0,2 mm a tím se výrazně zlepšila rozlišitelnost variace impaktního tlaku a to především co se týče směru hloubky paprsku. Tento rozdíl je demonstrován na obr. 3.8.



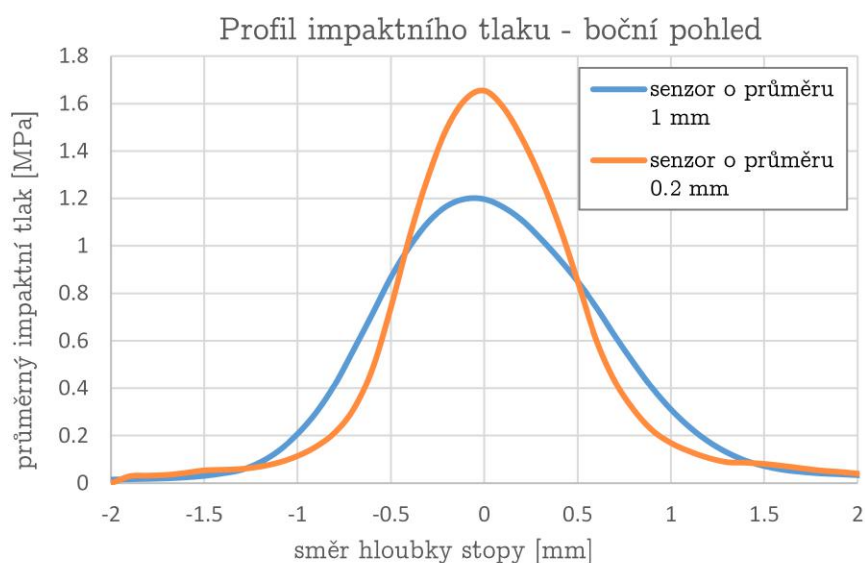
Obr. 3.8: Rozdíl ve velikosti senzoru vůči hloubce paprsku a) průměr senzoru 1 mm, b) průměr senzoru 0,2 mm

Díky většímu rozlišení dochází k nárůstu měřeného tlaku v daném (téměř bodovém) místě a u některých konfigurací je třeba použít senzor s rozsahem až 40 MPa. Rozdíl v měřených hodnotách lze porovnat na obr. 3.9.

### Současný stav aplikace metody v praxi

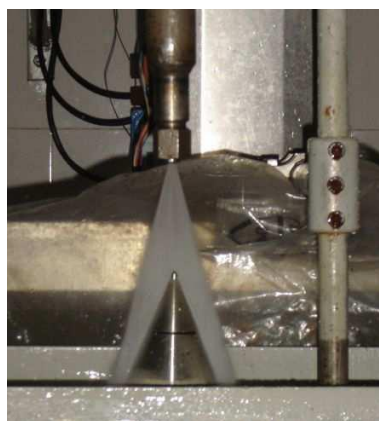
V současné době se měření impaktního tlaku využívá hojně v praxi. Jednotlivé metody měření jsou rozebrány například v článcích [17, 18, 41, 43, 44, 61, 62]. Obecně lze všechny tyto metody měření rozdělit do dvou typů přístupů.





Obr. 3.9: Rozdíl v měřených hodnotách impaktního tlaku pro identickou konfiguraci při pohledu z boku a) průměr senzoru 1 mm, b) průměr senzoru 0,2 mm

První přístup je měření pomocí tzv. pinu na stříšce. Tato metoda spočívá v použití součásti ve tvaru A, která má na svém vrcholu pin s podložkou (obr. 3.10). Při měření vodní paprsek tlačuje příslušnou silou tento pin a v závislosti na poloze jsou tato data zaznamenávána do matice a je vytvořen model rozložení impaktního tlaku. Podložky mají většinou kulatý či čtvercový tvar o průměru/straně 1 až 1,5 mm.

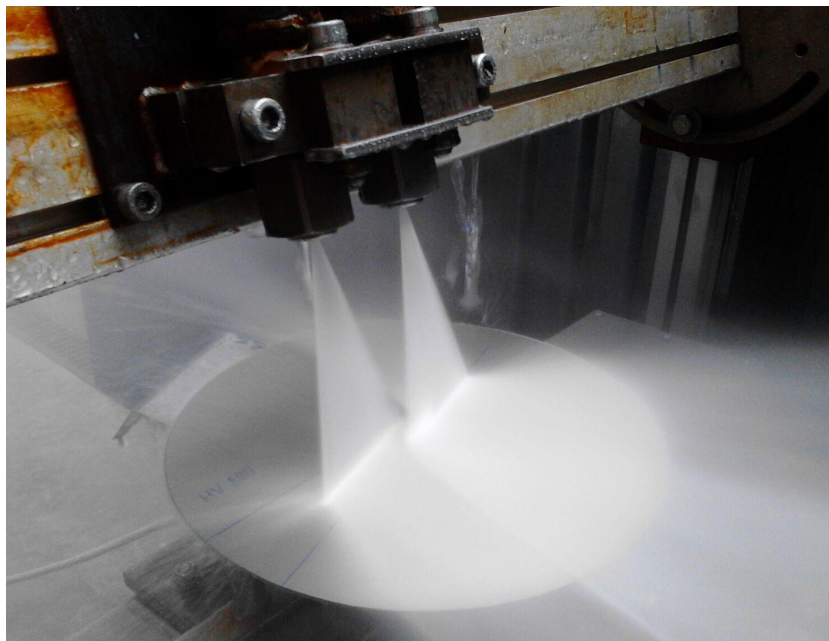


Obr. 3.10: Měření pomocí tzv. pinu na stříšce [43]

Druhým přístupem je již výše zmiňovaná metoda měření impaktního tlaku na zakalené desce s otvorem. V otvoru je umístěn tlakový senzor, který snímá tlak pro aktuální pozici (obr. 3.11).

Bohužel zatím neexistuje studie, která by tyto dva přístupy jakkoliv mezi sebou porovnávala a srovnávala jejich kvalitu.



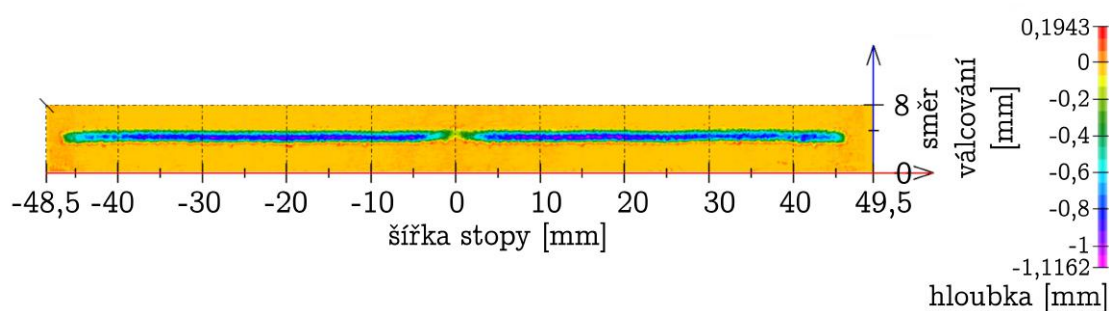


Obr. 3.11: Ukázka z měření vybrané konfigurace trysek pro dizertační práci

### 3.3 | Měření eroze vodního paprsku

Měření eroze vodního paprsku má za cíl především detailně prozkoumat abrazivní a mechanickou účinnost vodního paprsku a vzájemné konfigurace těchto vodních paprsků. Test spočívá v krátkém ostříku destičky, do které se abrazivními účinky paprsku vyryje odpovídající stopa (obr. 3.13). Ostříky trvají většinou v řádu desítek sekund. Jako vhodný materiál destiček je většinou určen hliník A1050, při testech konfigurací s menšími tlaky a abrazivními účinky lze použít i měkký vosk.

Vyhotovené destičky jsou poté scanovány 3D scannerem a vytváří se 3D model destičky (viz obr. 3.12), který lze analyzovat z hlediska délky vyhloubené stopy, hloubky vyhloubené stopy, ale lze jej i přímo porovnat s měřením impaktního tlaku pro případnou korelaci měření. Mezi měřením impaktního tlaku a erozivním testem pro stejnou konfiguraci lze často vidět velmi jasnou korelaci [A1].



Obr. 3.12: 3D model hliníkové destičky s erozí od páru vodních paprsků [A1]

### Současný stav aplikace metody v praxi

Jedná se o jednu z nejlevnějších metod zkoumání mechanických účinků vodního paprsku, protože je přibližně stejně náročná na přípravu jako metoda pro měření impaktního tlaku, ale na rozdíl od ní trvá samotný experiment v řádu desítek sekund. Tato metoda dalece přesahuje své uplatnění pouze ve výzkumu odkujovacích trysek. Používá se především pro analýzu mechanických účinků u trysek sloužících např. k řezání vodním paprskem, nicméně pro analýzu odkujovacích trysek je stejně vhodná.

Tato metoda je, v souvislosti s odkujovacími tryskami, popsána a použita například v článcích [13, 14, 17] a [67]. V článcích [15] a [16] je tato metoda použita k měření účinků tzv. pulzujících trysek, které vytvářejí rázy a mohou výrazně přispět k mechanickému účinku odkujování. Vývoj tohoto typu trysek pro odkujování je zatím v počátcích a právě pomocí erozivního testu lze zkoumat efektivnost jednotlivých prototypů. Touto problematikou se zabývá i Laboratoř přenosu tepla a proudění a v minulosti byly na toto téma publikovány články [19] a [57].

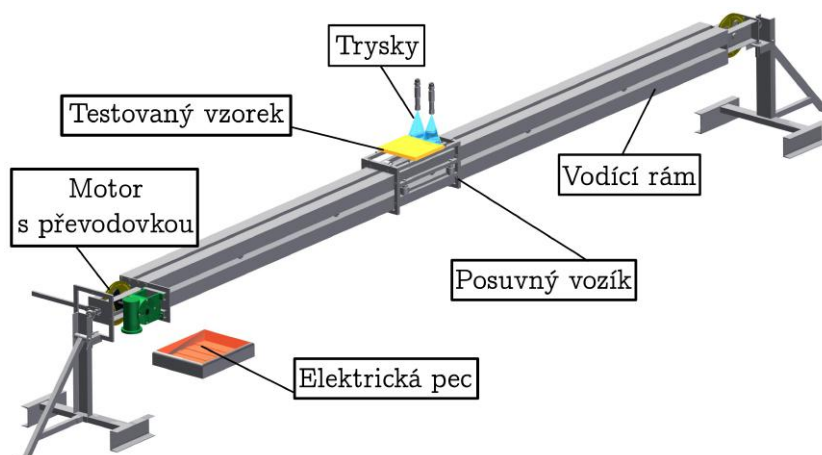


Obr. 3.13: Stopa erozí od páru vodních paprsků s naznačenou oblastí překryvu [13]

## 3.4 | Měření homogenity chlazení a součinitele přestupu tepla

Měření součinitele přestupu tepla a měření homogenity chlazení jsou dvě měření, která se mohou realizovat naráz při jediném průjezdu nahřátého vzorku pod tryskou. Měření se provádí na experimentálním zařízení (viz obr. 3.14). Vzorek – deska korozivzdorné oceli – je vybaven sérií zabudovaných podpovrchových termočlánků typu K, které jsou schopny snímat teploty v rozsahu od  $-200$  do  $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Termočlánky jsou zabudovány pod povrchem v hloubce několika desetin milimetrů až milimetrů [11]. Deska se nahřívá v elektrické peci, dokud teplota vzorku nedosáhne požadované předepsané teploty. Především se dbá na to, aby byla deska dostatečně rovnoměrně prohřátá. Po dosažení požadované teploty je deska vyjmuta z pece a neprodleně projíždí na posuvném vozíku skrz sekci se stříkajícími odkujovacími tryskami. Termočlánky tedy zaznamenají patřičný pokles teplot a tato data později slouží společně

se záznamem polohy vozíku jako surový vstup pro inverzní úlohu výpočtu součinitele přestupu tepla.



Obr. 3.14: Linear – experimentální zařízení určené pro měření součinitele přestupu tepla a měření homogenity chlazení

### 3.4.1 | Měření součinitele přestupu tepla

#### Součinitel přestupu tepla

Součinitel přestupu tepla slouží k popsání složité teplotní dynamiky procesů, které se dějí vlivem konvekce (proudění) podél povrchů obtékaných tekutinou. V našem případě se jedná o interakci vodního paprsku s velmi horkým povrchem oceli. V české literatuře se setkáme s označením  $\alpha$ , v zahraniční pak s  $h$  či zkratkou HTC od slovního spojení *heat transfer coefficient*.<sup>1</sup> Zjednodušeným modelem konvekce může být rovnice

$$q = h(T_{\infty} - T),$$

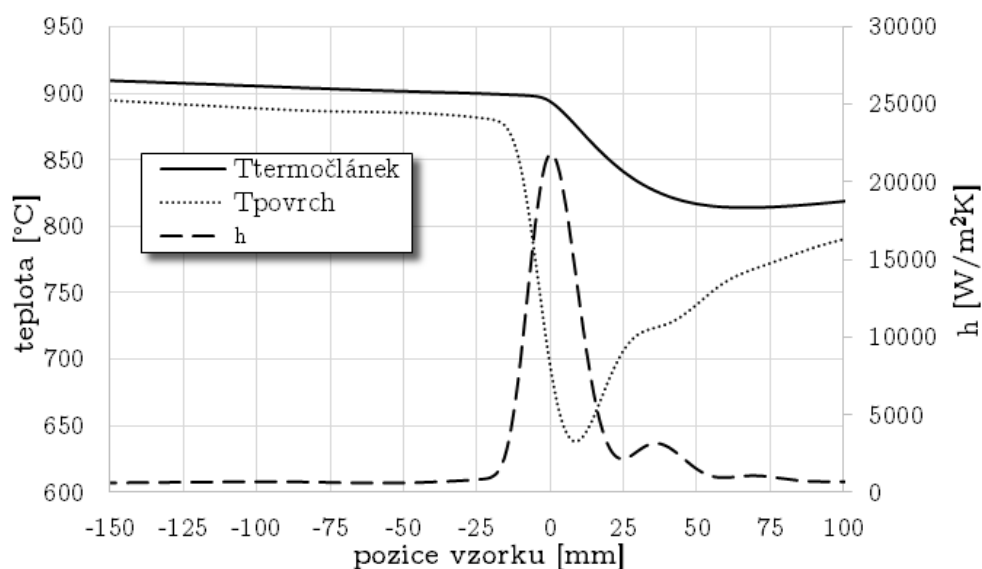
kde  $q$  odpovídá hustotě tepelného toku ve  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $T_{\infty}$  je teplota tekutiny v klidovém stavu a  $T$  je povrchová teplota obtékaného povrchu. Součinitel přestupu tepla má tedy jednotku  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ . Hodnota tohoto součinitele závisí na mnoha parametrech, především však na rychlosti tekutiny, její viskozitě, hustotě a samotné teplotě povrchu. V našem případě závisí hodnota součinitele i na vzájemné poloze povrchu ostříkávaného materiálu a vodního paprsku.

Měření a následný výpočet součinitele přenosu tepla probíhá přes tzv. inverzní úlohu přenosu tepla. V principu se jedná o to, že v přímé úloze přenosu tepla známe okrajové podmínky úlohy (pro nás je představuje součinitel přestupu tepla  $h$ ) a odpovídáme na otázku, jaké je výsledné teplotní pole uvnitř. Při měření ovšem měříme

<sup>1</sup>V dizertační práci je využita anglická notace, neboť písmeny řecké abecedy jsou označovány úhly. V případě  $\alpha$  se jedná o úhel rozstříku trysky.

nepřímo povrchovou teplotu  $T$  a součinitel  $h$  z ní vypočítáme. Úloha je ztížená tím, že není možné efektivně měřit teplotu  $T$  přímo v místě povrchu v průběhu celého chlazení a měří se tedy pouze teplota  $T'$  těsně pod povrchem, která je následně přepočtena na povrchovou teplotu  $T$ . Nevýhodou tohoto postupu je především to, že celý proces je poměrně rychlý a teplotní pokles tedy trvá velmi krátkou dobu, proto je vhodné mít termočlánky instalované pokud možno co nejbližší povrchu, aby došlo k co nejmenšímu znehodnocení informace o povrchové teplotě.

Typický průběh měřené teploty  $T'$ , vypočtené povrchové teploty  $T$  a součinitele přestupu tepla  $h$  je možné vidět na obr. 3.15. Na tomto příkladu je názorně vidět, jak málo je měřená teplota  $T'$  pod povrchem ovlivněna vzhledem k průběhu teploty na povrchu. V průběhu hodnoty součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici si lze všimnout druhého menšího maxima mezi hodnotami 25 a 50 mm. Toto maximum nemá fyzikální význam a je způsobeno výpočetní metodou.



Obr. 3.15: Typický průběh součinitele přestupu tepla v závislosti na poloze vzorku

### Současný stav aplikace metody v praxi

Metodami výpočtu součinitele přenosu tepla pomocí inverzních úloh se zabývají především zdroje [22, 34, 53, 54, 58]. Ve stručnosti lze shrnout, že inverzní úlohy v přenosu tepla jsou poměrně obtížné úlohy z důvodu velké citlivosti na chyby. Podstatné jsou pro řešení tzv. koeficienty citlivosti definované jako derivace teploty  $T$  dle hustoty tepelného toku  $q_M$  v daném místě a čase. Metody řešení inverzních úloh můžeme dělit na jednokrokové, sekvenční nebo celodoménové.

Metoda měření součinitele přestupu tepla je v Laboratoři přenosu tepla a proudění realizována již několik let a to jak pro potřeby určení intenzity chlazení při

odkujování, tak při technologii chlazení válců a samotných rozvalků. Toto téma shrnují na Laboratoři přenosu tepla a proudění například články [27, 28, 35, B1] či [A3].

Zatímco u přirozené konvekce se součinitel přestupu tepla  $h$  pohybuje v řádu jednotek až desítek, při nucené konvekci lze dosáhnout až hodnot v řádu desítek tisíc [3]. Hodnota  $h$ , stejně jako intenzita chlazení, závisí především na průtoku tryskou, typu trysky, doby samotného ostříku, vlastnosti okujů a impaktním tlaku [13]. Články [30] a [11] stanovují součinitel přestupu tepla na základě provedených měření. Článek [30] se zabývá intenzitou chlazení pro impaktní tlaky v rozmezí 0,4 až 0,8 MPa při rychlosti vzorku 1 m/s. Vypočtené hodnoty součinitele  $h$  se pohybují od 270 do 430 kW·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>. Článek [11] oproti tomu stanovuje hodnoty součinitele  $h$  od 17,65 až do 19,9 kW·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup> a to bez bližší specifikace impaktního tlaku.

Článek [24] zkoumá tuto problematiku z pohledu simulací a pro úhel rozstříku 30°, teplotu vody 25 °C různá nastavení teplot povrchů (1 000 až 1 200 °C), různé vzdálenosti trysky od povrchu (100 až 250 mm) a různé rychlosti proudění (100 až 150 m/s). Autor udává hodnoty součinitele  $h$  v širokém rozmezí 10 až 110 kW·m<sup>-2</sup>·K<sup>-1</sup>. Článek je ovšem velmi stručný, co se týče popisu samotného modelu a omezuje se pouze na větu, že závislost byla modelována pomocí softwaru fluent.

Závěry jednotlivých článků ukazují o jak širokou paletu výsledků se může jednat. Články neuvádějí na jakém úseku je okrajová podmínka aplikována a vyjadřují hodnotu součinitele přestupu tepla pomocí jediné hodnoty, což je u takto dynamického procesu velmi zjednodušující. Pravděpodobně se zde jedná také o velký vliv měřicích metod a proto není vhodné porovnávat jednotlivé výsledky vědeckých týmů mezi sebou. Samotný článek [11] také přiznává velkou obtíž při měření teplot pomocí termočlánků a jejich obtížnou instalaci. Proto není vhodné u jednotlivých experimentů považovat konkrétní hodnotu součinitele  $h$  za směrodatnou. Vhodnějším přístupem je srovnávání výsledků ze sérií experimentů na daném pracovišti. Tím lze jednoznačně určit, které parametry mají na chlazení zásadní vliv a jaký je jejich efekt (lineární, kvadratický, exponenciální, ...).

### Technické specifikace nastavení experimentů

Všechny experimenty, které stanovovaly součinitel přestupu tepla, prezentované v této dizertační práci byly měřeny jednotně na stejné desce o tloušťce 25 mm z materiálu 1.4828 (ACRONI11 Si). Termočlánek typu K byl zabudován v předvrtané díře o průměru 0,54 mm, kolmo k ostříkávanému povrchu. Čelo termočlánku bylo přivařeno k původnímu materiálu. Vzdálenost termočlánku od chlazeného povrchu byla 0,35 mm.

### 3.4.2 | Měření homogenity chlazení

Měření homogenity chlazení je realizováno pomocí řádkového infračerveného skeneru Raytek RAYTMP1501M, který pracuje s frekvencí až 150 Hz a rozlišitelností až 1 024 bodů na řádek. Měřicí rozpětí zařízení se pohybuje od 600 až po 1 200 °C. Snímač je umístěn v takové vzdálenosti za odkujovací sekci, aby vznikající pára na desce nezneškodnovala výsledné měření a zároveň tak, aby docházelo k co nejmenšímu zkreslení výsledku v důsledku rychlého vyrovnání teplot na povrchu desky.

Tato měření lze poté využít například pro odhad součinitele přestupu tepla, jak je uvedeno v [20, 49] a [50]. Při této metodě je měřena teplota desky v dané vzdálenosti před a po chladicí sekci. Algoritmus předpokládá průběh součinitele přestupu tepla jako funkci, která je definována po částech jako funkce hustoty normálního rozdělení. Tato funkce je dle měřených hodnot dotvarována pomocí příslušného parametru, který je vypočítán pomocí inverzní úlohy. Tato metoda je vhodná pro průmyslové použití, protože nevyžaduje zabudování termočlánků. Díky nedostatku informací z experimentu se ovšem musíme spokojit i s méně vypovídajícími výsledky, protože přímo předpokládáme průběh funkce součinitele  $h$  v závislosti na poloze.

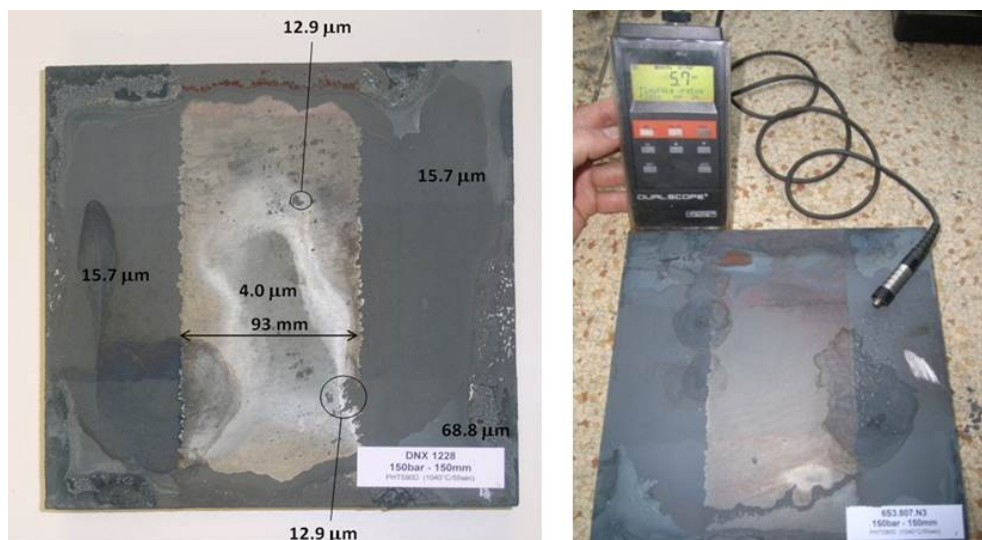
## 3.5 | Měření kvality odkujení

Měření kvality odkujení je jedním z posledních experimentů, na kterém se reálně ověří efektivita dané konfigurace.

Vzorek dané oceli je nahřát v peci na příslušnou teplotu a po příslušnou dobu. Složení vzorku a doba oxidace je určena tak, aby se na povrchu vzorku vytvořily příslušné typy okují v požadovaném složení a tloušťce. K tomu je nutné samozřejmě znát složení vzorku a rychlost vyvíjení tloušťky okují v závislosti na čase. Tyto informace je nutné předem také ověřit experimentem.

K samotnému měření je využíváno experimentální zařízení ilustrované na obr. 3.14. Vzorek projede odkujovací sekci a poté je zchlazen v ochranné atmosféře. Na vzorku se následně hodnotí tloušťka vytvořených okují v místě ostříku vodních paprsků a mimo něj (obr. 3.16). Měření se provádí pomocí elektromagnetické sondy Fischer Technology Dualscope MP20, která pracuje na principu magnetické indukce a vířivých proudů v materiálu. Pro vyhodnocení se často používá jako směrodatný parametr procento tloušťky okují v místě ostříku vodních paprsků vůči tloušťce vytvořených okují mimo odkujovací sekci.





Obr. 3.16: Měření tloušťky okují po testu kvality odkujení [39]

### Současný stav aplikace metody v praxi

Jedná se o metodu používanou převážně v průmyslu, neboť válcovny mají větší nou přímo k dispozici přesný materiál, který válcují a na kterém lze přímo vhodné nastavení trysek odzkoušet. Ve výzkumu se dává přednost spíše dříve popsaným metodám a to především z důvodu velmi špatné opakovatelnosti experimentů. Špatná opakovatelnost je způsobena především zvýšenou citlivostí materiálu na vývoj určitého typu a tloušťky okují. Zřídka kdy se podaří vyvinout vrstvu okují se stejnými vlastnostmi dvakrát za sebou. Lze tedy velmi špatně usuzovat jen na základě těchto testů o nějakém obecném závěru.

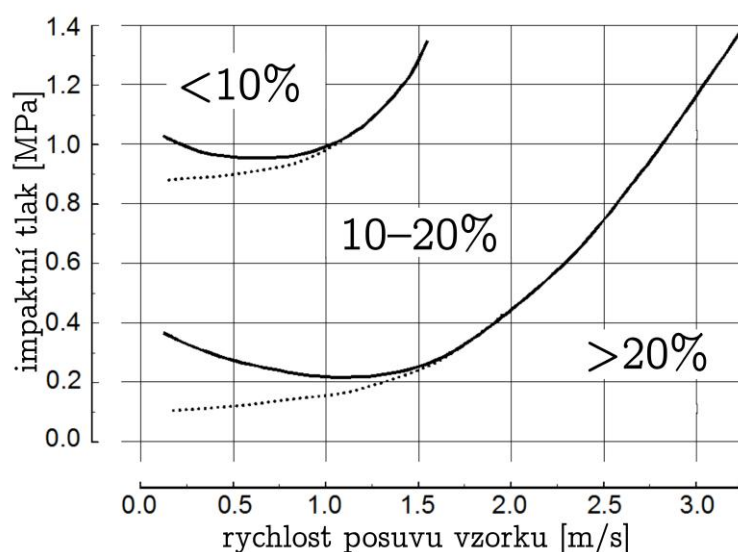
V současné době jsou tyto testy součástí rozsáhlejších studií v oblasti odkujování, jakými jsou například [13] nebo [59]. Studie [59] se zabývá procesem odkujování především z hlediska vhodného výběru povlaků, studie [13] se pak zaměřuje spíše na porovnání klasického konvenčního procesu odkujování vodním paprskem s moderní technologií „shot blasting“, kde je povrch s vrstvou okují ostřelován abrazivem (většinou kuličkami z tvrdokovu).

Ve studii [13] jsou uvedeny výsledky experimentů v závislosti na měřeném impaktním tlaku/impaktní síle a rychlosti posuvu, ze které vyplývá, že větší impaktní tlak a pomalejší rychlost pohybu vzorku mají na kvalitu odkujení příznivý vliv. Studie ovšem zároveň ukazuje, že u některých vzorků při zachování podobných podmínek došlo k různým výsledkům. Tento nesoulad může být způsoben právě špatnou opakovatelností při experimentech.

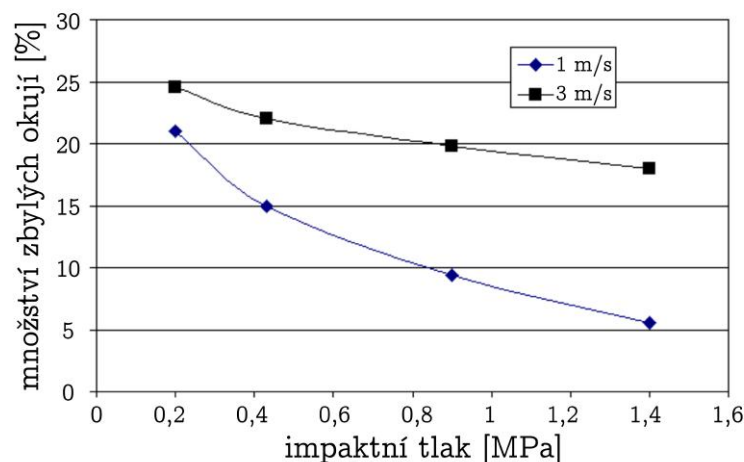
Na Laboratoři přenosu tepla a proudění byly realizovány tyto testy také a výsledky jsou graficky shrnuty v obr. 3.17 a 3.18. Oproti studii [13], která experimenty rozděluje pomocí kritéria vyhovující/nevyhovující povrch, rozděluje obr. 3.17 vý-

sledky dle procenta odstraněných okují. Studie [13] separuje výsledky experimentů pomocí lineárního vztahu mezi rychlostí a impaktním tlakem, přičemž u experimentů s parametry nad přímkou předpovídá vyhovující povrch, u experimentů s parametry pod přímkou předpovídá nevyhovující povrch. Obr. 3.17 ukazuje, že tato problematika může být složitější, neboť u velmi malých rychlostí posuvu vzorku bylo zjištěno překvapivé zhoršení na kvalitě povrchu.

Obr. 3.18 ilustruje problematiku pro špatně odkujitelné oceli s příměsí křemíku. Pro rychlost 1 m/s lze vidět výrazné zlepšení kvality povrchu. Tohoto zlepšení je ovšem dosaženo na úkor rychlosti samotného válcování, což výrazně snižuje ekonomičnost výroby.



Obr. 3.17: Kvalita odkujení v závislosti na rychlosti a impaktním tlaku [56]



Obr. 3.18: Kvalita odkujení v závislosti na rychlosti pro ocel s příměsí křemíku [56]





## Praktická část

Praktická část se skládá ze 6 sekcí, které odpovídají 6 výzkumným cílům, a zpracovává více než 350 měření 7 různých typů. Aby bylo pro čtenáře jednodušší se v těchto měřeních orientovat, jsou měření pojmenována jednotnou strukturou. Každý experiment je označen příslušným písmenem typu experimentu následovaný číslem, které udává, ke kterému výzkumnému cíli se výsledek váže. Následují dvě číslice specifikující pořadí měření dle toho, jak je uvedeno v textu a případně je název doplněn koncovým písmenem, které určuje nějaký typ podobného experimentu, který vychází z experimentu stejného označení bez písmene. V rámci každého prezentovaného cíle se číselné označení konfigurace zachovává, tj. například experimenty I509, E509, T509, H509 měří různými způsoby tu samou konfiguraci.

Tab. 4.1: Vysvětlení názvosloví

	P	A	B	C	p
Analýza okují	O	číslo cíle	pořadí měření v kapitole		doplňkové písmeno
Fotografie	F				
Impaktní tlak	I				
Eroze paprsku	E				
Homogenita chlazení	T				
Součinitel přestupu tepla	H				
Kvalita odkujení	Q				

Tabulka 4.2 dále uvádí seznam odkujovacích trysek, které jsou na Laboratoři přenosu tepla a proudění k dispozici. Jedná se o 9 párů trysek od 3 různých výrobců. Výrobci jsou označeni pouze kódem A, B nebo C. Pro všechny trysky byl stanoven profil jejich impaktního tlaku. V závislosti na tomto profilu byly pro dizertační práci zvoleny pouze trysky 1, 2, 4, 5, 5a, 6, 8 a 9.

Tab. 4.2: Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody

Označení trysky	Výrobce	Úhel rozstříku $\alpha_{nom}$ uváděný výrobcem [°]	Průtok vody tryskou při 10 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 20 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 40 MPa [l/min]	Průtok vody pro 20 MPa na stupeň [l/min/°]
Tryska 1	A	40	12	17	24	0,43
Tryska 2	B	52	12,3	17,3	24,5	0,33
Tryska 3	A	40	15	21,21	30	0,53
Tryska 4	A	30	18	25,46	36	0,84
Tryska 5	C	45	29	41	58	0,91
Tryska 5a (opotřebovaný kus)	C	45	29	41	58	0,91
Tryska 6	A	40	28	39,6	56	0,99
Tryska 7	A	30	28	39,6	56	1,32
Tryska 8	A	22	36	50,9	72	2,31
Tryska 9	C	27	67,7	95,7	135	3,54

## 4.1 | Nalezení vhodného typu oceli a parametrů oxidace pro prokazatelná měření kvality odkujení

První cíl dizertační práce mapuje vývoj výšky a struktury okují u vybraných typů ocelí, které byly na Laboratoři tepla a proudění k dispozici a u kterých se v měřeních kvality odkujení vytvářely okuje takového charakteru, že bylo možné porovnat a vyhodnotit jednotlivé odkujované oblasti mezi sebou.

### 4.1.1 | Ocel 54SiCr6

V souladu s teoretickým úvodem v kapitole 1 byla jako první materiál pro analýzu zvolena křemíková pružinová ocel 54SiCr6 (ČSN EN 1.7102; ČSN 14 260), která je určena pro namáhané pružiny silničních a kolejových vozidel. Přestože se později tato ocel ukázala jako vhodná pro porovnávání efektivity odstraňování okují pouze ve specifických případech, je v této části dizertační práce uvedena celá analýza vzorků, která byla realizována ještě před samotnými měřeními kvality odkujení. Analýza pro podobný typ oceli nebyla totiž v žádné dostupné literatuře nalezena. Chemické složení oceli 54SiCr6 uvádí tabulka 4.3.

Tab. 4.3: Chemické složení zkoumané oceli 54SiCr6 [6] [9]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr
Složení [hm. %]	0,51–0,59	1,2–1,6	0,5–0,8	max 0,025	max 0,025	0,5–0,8

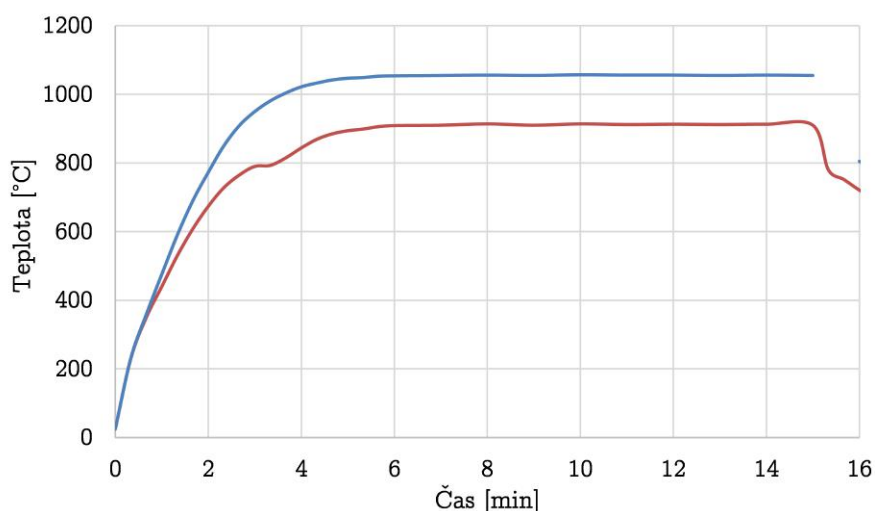
Průběh tvorby okují byl zkoumán pro tři různé teploty a pět různých časů. Rozvržení plánu měření shrnuje tabulka 4.4. Při teplotě 1 200 °C docházelo k velmi rychlému nárůstu okují, proto byl maximální čas oxidace zkrácen na 60 minut.

Tab. 4.4: Plán měření struktury oxidů testované oceli 54SiCr6

Čas \ Teplota	900 °C	1 050 °C	1 200 °C
15 min	•	•	•
30 min	•	•	•
45 min			•
60 min	•	•	•
120 min	•	•	

Pro analýzu okují byly zhotoveny vzorky o rozměrech 20×20×25 mm. Na povrch těchto vzorků byl přibodován termočlánek, který měřil průběh teploty během experimentu. Vzorek byl následně vyjmut z pece a k postupnému ochlazení docházelo

v inertním prostředí. Průběh teploty při měření pro teploty 900 °C a 1050 °C a čas 15 minut je popsán na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Průběh teploty vzorku při měření

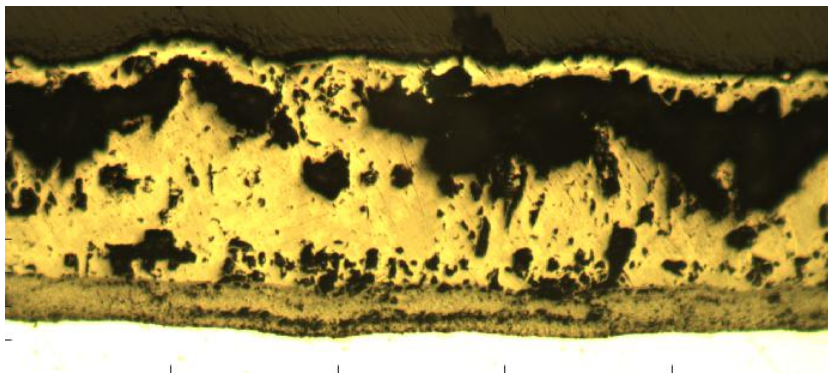
Vzorky byly poté zality v samopolymerizující pryskyřici Duracryl, rozříznuty, vybroušeny a struktura okujů byla vyfocena na mikroskopu.<sup>1</sup>

Snímky z mikroskopu byly počítačově zpracovány pomocí skriptu napsaném v Matlabu, který byl vyvinut v rámci dizertační práce. Skript používá metodu prahování pro identifikaci příslušné vrstvy okujů. Toto zpracování je ilustrováno na obrázcích 4.2 a 4.3. Poté byla stanovena výška okujů v každém bodovém výřezu šířky snímku.

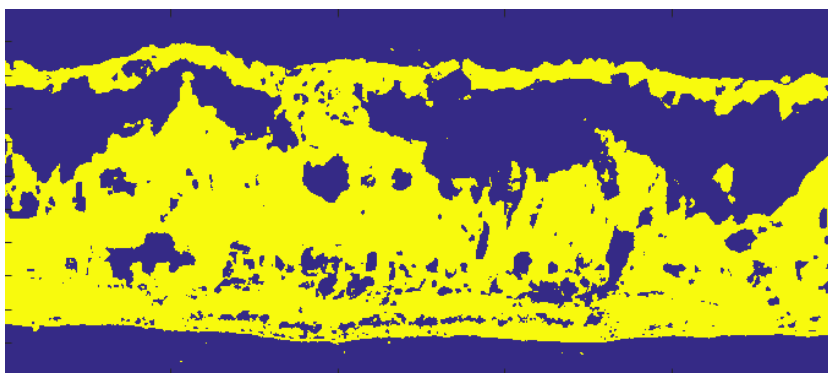
Na tomto souboru dat byla provedena statistika (krabicový graf a průměrná hodnota). Tyto hodnoty jsou vždy pro příslušnou sérii měření za dané teploty zobrazeny společně v grafu (viz grafy u obrázků 4.4, 4.6, 4.9). Krabicový graf vždy zobrazuje příslušné kvartily a medián. Průměr všech hodnot je označen oranžovým bodem.

Informace o průměrné hodnotě výšky okujů v jednotlivých fotografiích byly zpracovány regresní analýzou dle modelu růstu okujů  $z_p = k(T)\sqrt{t} + a$  prezentovaném v kapitole 1. Konstanta  $a$  je zde zavedena z důvodu zlepšení přesnosti popisovaného modelu. Pokud bylo k dispozici více fotografií pro danou teplotu a čas, je k dispozici i více stanovených hodnot průměrných výšek okujů. Tyto průměry jsou zobrazeny v příslušných grafech (viz obrázky 4.5, 4.7, 4.10) jako černé body. Příslušná regresní funkce je zde také zobrazena černě. Oranžové meze určují oblast konfidenčního intervalu, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet i skutečný výsledek regresní funkce. Žlutě je označen predikční interval, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet libovolné další měření, které bude provedeno za stejných

<sup>1</sup>Za realizaci této praktické části měření bych ráda poděkovala svému kolegovi Ing. Martinu Chabičovskému, Ph.D., který mi pomohl pořídit tato data v době mého těhotenství.



Obr. 4.2: Fotografie vrstvy oxidů v mikroskopu. Zvětšení 10×



Obr. 4.3: Identifikace vrstvy oxidů pomocí obrazové analýzy. Zvětšení 10×

podmínek, jako měření určující danou regresní funkci.

Pro jednotlivé teploty jsou výsledky experimentů prezentovány odděleně. Fotografie analyzovaných struktur jsou prezentovány v příloze A.

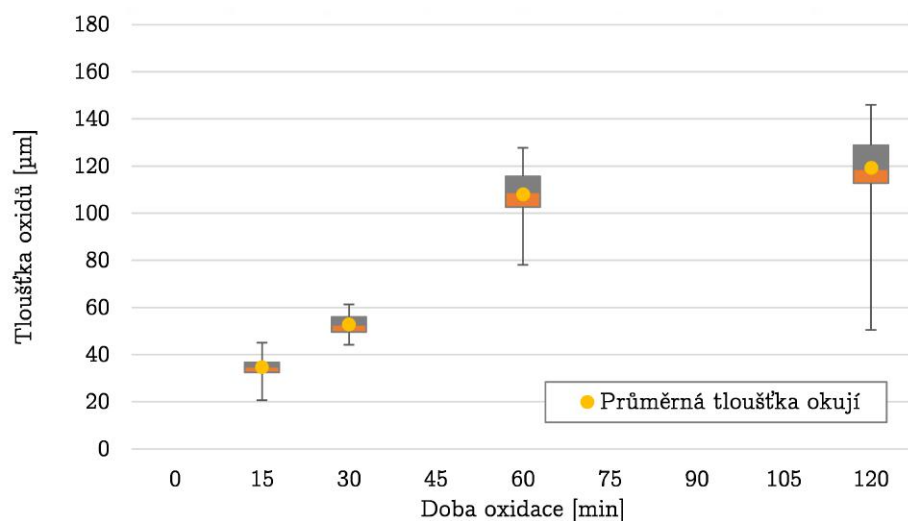
### Teplota 900 °C

Při teplotě 900 °C docházelo k postupnému nárůstu vrstvy okují v závislosti na čase. Krabicové grafy pro jednotlivé teploty jsou zobrazeny na obrázku 4.4. Po první hodině oxidace se vrstva okují jevila stále kompaktní. Při dvouhodinovém času oxidace již docházelo k trhlinám ve svrchní vrstvě okují, což se projevilo i ve snížení změřené minimální výšce vrstvy. Fotografie struktury okují jsou uvedeny v příloze A.1.1.

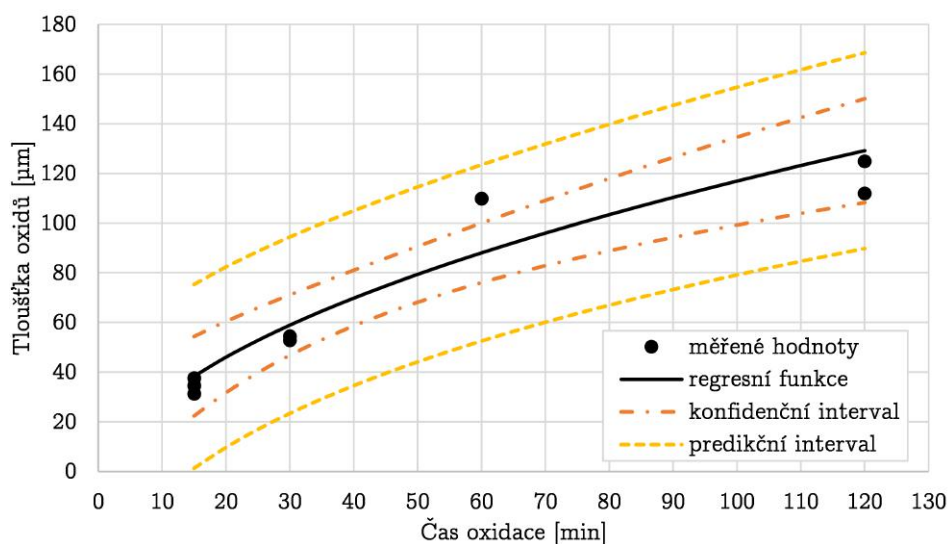
Regresní rovnice růstu okují pro teplotu 900 °C byla

$$z_p = -11,338 + 12,826\sqrt{t} \quad [\mu\text{m}],$$

kde  $z_p$  označuje průměrnou výšku okují v závislosti na čase oxidace  $t$  (viz obrázek 4.5). U experimentu s časem oxidace 60 minut došlo k velké relativní odchylce od předpokládaného modelu. Je možné, že výška okují roste v úseku 15 až 60 minut lineárně a až po té parabolickou charakteristikou. Tento model by byl ovšem parametricky náročnější a s daným počtem měření i značně nespolehlivý.



Obr. 4.4: Krabicový graf tloušťky vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 900 °C



Obr. 4.5: Graf regresní funkce  $-11,338 + 12,826\sqrt{t}$  pro teplotu 900 °C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%),  $R^2 = 0,885$

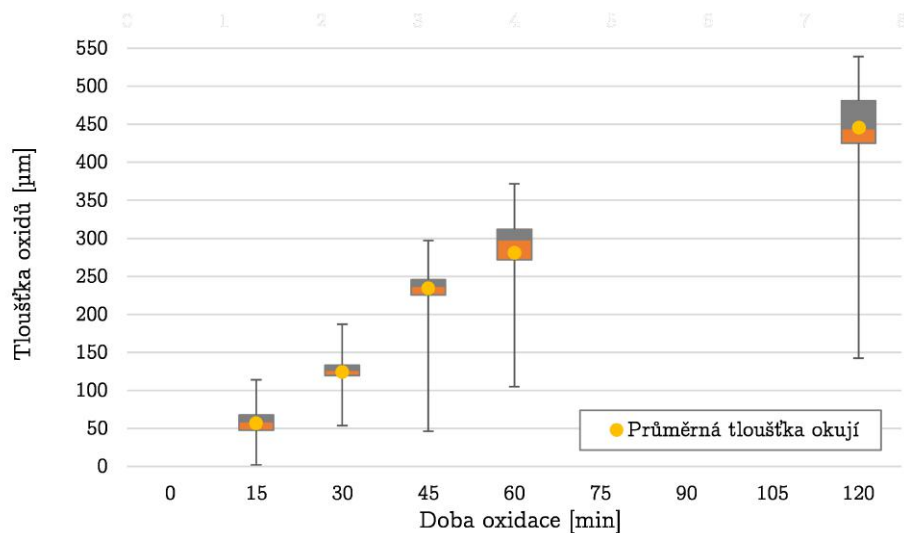
### Teplota 1050 °C

Při teplotě 1050 °C již docházelo ke zrychlení vývoje výšky tvořených okují. Identifikovaná výška okují vykazovala podstatně větší rozptyl na všech teplotách (viz obrázek 4.6). Hodnota minimální výšky okují opět poukazuje na výskyt trhlin ve vrstvě. Rozdíl mezi prvním a třetím kvartilem je ovšem relativně malý a výška vrstvy tedy vykazuje stálost po délce. Fotografie struktury okují jsou uvedeny v příloze A.1.2.

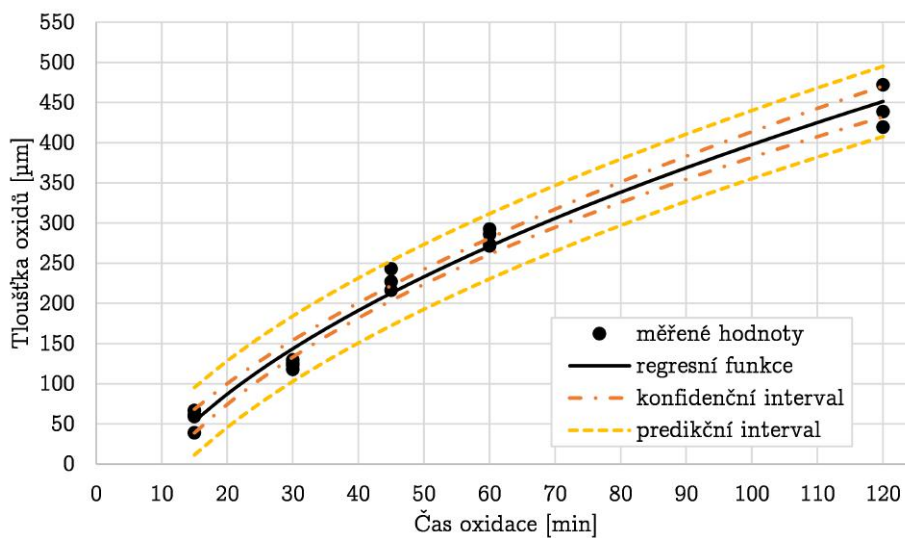
Regresní rovnice růstu okují pro teplotu 1 050 °C byla

$$z_p = -164,17 + 56,188\sqrt{t} \quad [\mu\text{m}].$$

kde  $z_p$  označuje průměrnou výšku okují v závislosti na čase oxidace  $t$  (viz obr. 4.7).



Obr. 4.6: Krabicový graf tloušťky vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1 050°C

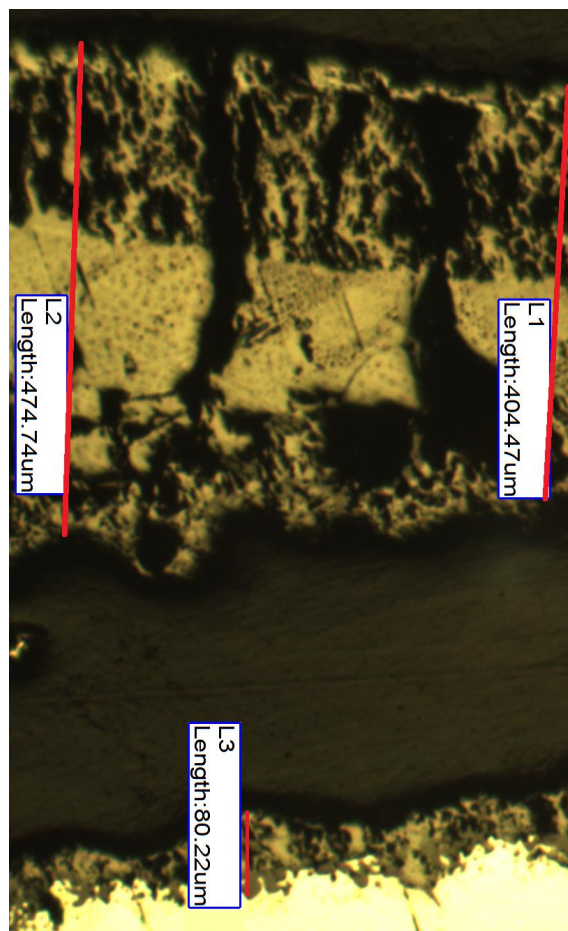


Obr. 4.7: Graf regresní funkce  $-164,17 + 56,188\sqrt{t}$  pro teplotu 1 050°C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%),  $R^2 = 0,9822$

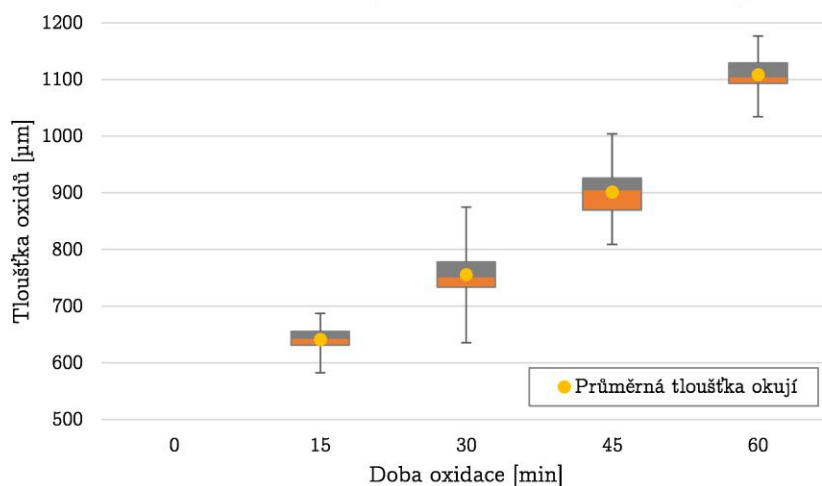


## Teplota 1 200 °C

Teplota 1 200 °C již velmi výrazně akceleruje růst výšky okují dochází k výraznému růstu především svrchní vrstvy oxidu železnatého  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Tato vrstva opět vykazuje porézní strukturu a značné množství trhlin. Vrstva se postupně odděluje od základní vrstvy okují obsahující především oxid železnatý  $\text{FeO}$  a oxid železnato-železitý  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Mezi těmito vrstvami vzniká dokonce mezera a proto lze obě tyto vrstvy hodnotit i odděleně. Strukturu okují ilustruje obrázek 4.8. Výška okují jako celku se pohybuje již po 15 minutách pohybuje v rozmezí 590 až 690  $\mu\text{m}$  (viz obrázek 4.9). Variabilita se v závislosti na čase ovšem výrazně nemění a v rámci měřeného časového úseku není pozorovatelná ani počínající saturace a výrazné snížení rychlosti růstu. Fotografie struktury okují jsou uvedeny v příloze A.1.3.



Obr. 4.8: Ilustrační obrázek struktury okují pro čas oxidace 30 minut při teplotě 1 200 °C

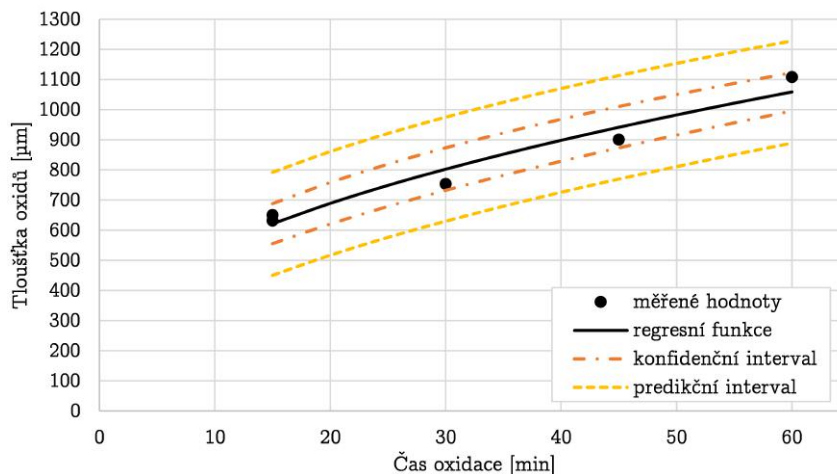


Obr. 4.9: Krabicový graf tloušťky vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1 200 °C

Regresní rovnice růstu okují pro teplotu 1200 °C byla stanovena na

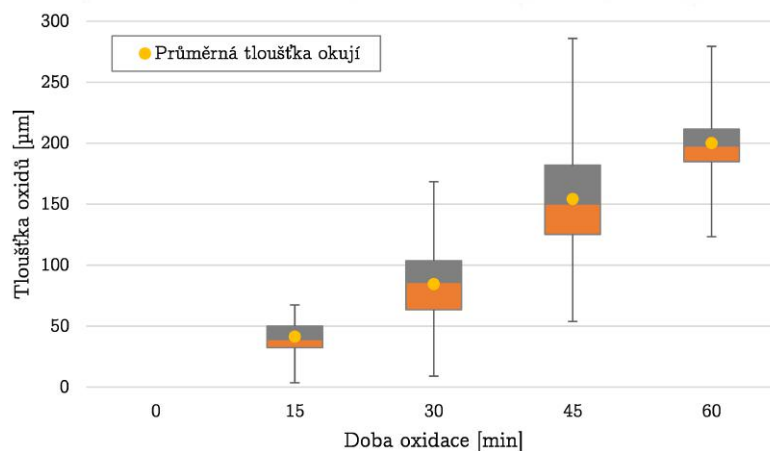
$$z_p = -183,93 + 112,96\sqrt{t} \quad [\mu\text{m}].$$

kde  $z_p$  označuje průměrnou výšku okují v závislosti na čase oxidace  $t$  (viz obrázek 4.10). Samotný rozptyl hodnot v modelu byl ovšem relativně velký, což je způsobeno i malým počtem použitelných vzorků vhodných k analýze na mikroskopu.



Obr. 4.10: Graf regresní funkce  $-183,93 + 112,96\sqrt{t}$  pro teplotu 1200 °C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%),  $R^2 = 0,9534$

Identifikací vrstev lze dále ještě popsat rychlost růstu spodní vrstvy tvořené převážně oxidem železnatým FeO a oxidem železnato-železitým Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> a dalšími příměsmi. Ve spodní části vrstvy okují docházelo často k vrůstům okují do oceli. Fotografie těchto vrůstů jsou uvedeny v příloze A.1.3. Krabicové grafy výsledků jsou uvedeny v grafu na obrázku 4.11.

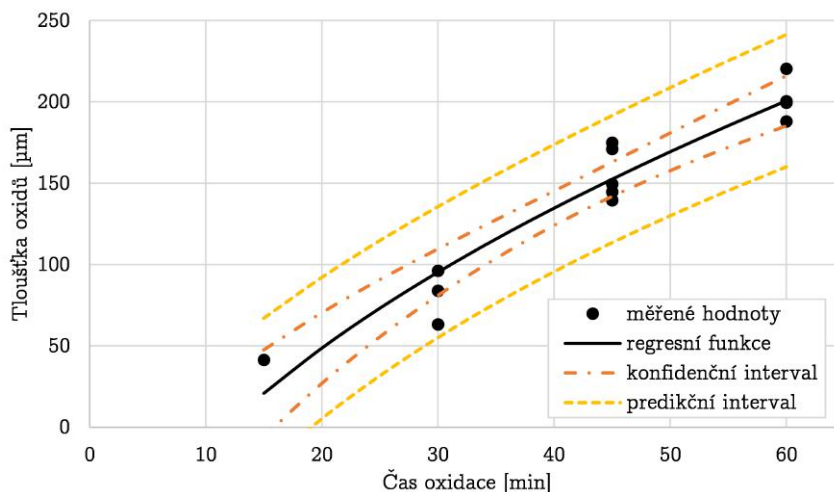


Obr. 4.11: Krabicový graf tloušťky dolní vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1200 °C

Regresní rovnice růstu spodní vrstvy okují pro teplotu 1 200 °C byla stanovena na

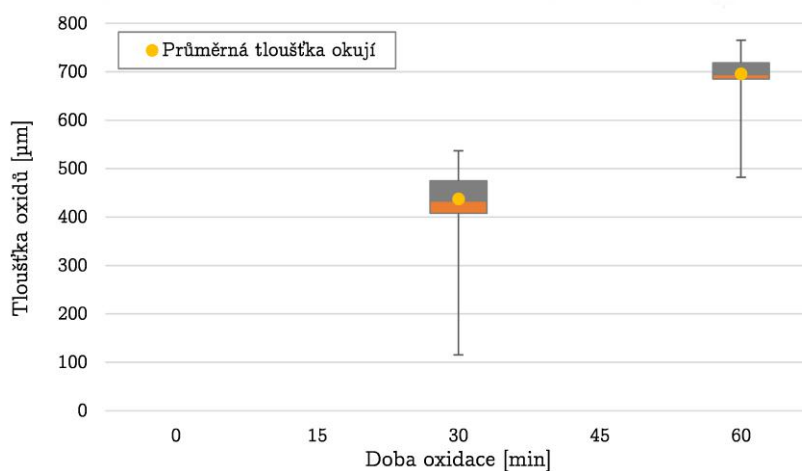
$$z_p = -159 + 46,432\sqrt{t} \quad [\mu\text{m}].$$

kde  $z_p$  označuje průměrnou výšku okují v závislosti na čase oxidace  $t$  (viz obrázek 4.12).



Obr. 4.12: Graf regresní funkce  $-159 + 46,432\sqrt{t}$  pro spodní vrstvu okují u oceli a teplotu 1 200°C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%),  $R^2 = 0,9169$

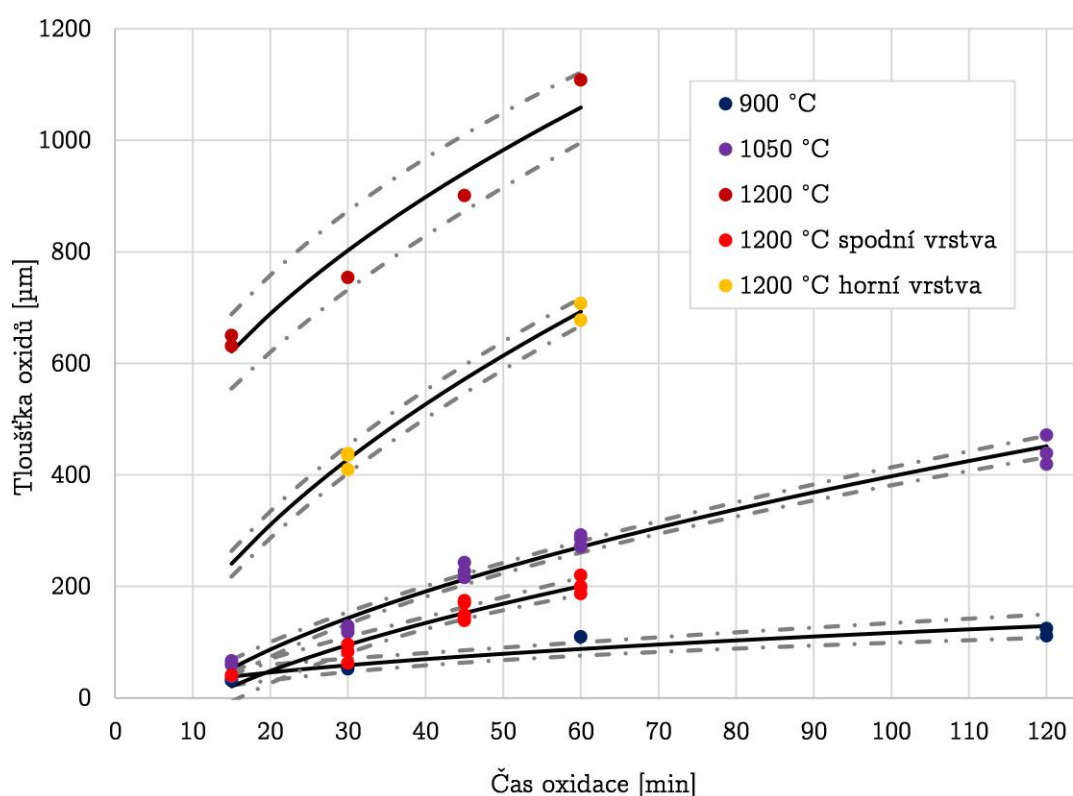
Svrchní vrstva byla dobře identifikovatelná jen pro experimenty s dobou oxidace 30 a 60 minut. V rámci vyhodnocení výsledků je proto uveden pouze krabicový graf na obrázku 4.13. Vrstva samotná byla porézní, měla poměrně homogenní tloušťku (rozdíl prvního a třetího kvartilu byl minimální) s řadou velmi úzkých trhlin, což se projevilo náhlým poklesem stanovené tloušťky vrstvy.



Obr. 4.13: Krabicový graf tloušťky horní vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1 200°C

### Souhrnné zhodnocení

Souhrnné výsledky růstu okují jsou uvedeny v grafu na obrázku 4.14. Kolem každé regresní křivky je naznačen i 95% konfidenční interval. Se zvyšující se teplotou značně roste rychlost růstu okují i jejich tloušťka. Výsledky experimentů při teplotě 1 200 °C vykazují širší konfidenční interval, který je způsoben změnou struktury okují (viz příloha A.1.3). Při této teplotě dochází k postupnému rozdělování vrstvy okují na dvě podvrstvy, horní a spodní. V případě horní vrstvy nebyl k dispozici dostatek fotografií k analýze a výsledky je proto třeba brát s rezervou. Lze předpokládat, že horní vrstva nebude klást při procesu odkujení výraznější odpor. Spodní vrstva okují ovšem bohužel vrůstá do materiálu oceli a může tedy představovat problém. Na výsledky těchto experimentů navazují experimenty Q405, Q405a, Q501b, Q509a a Q509b měření kvality odkujení v kapitolách 4.4 a 4.5.



Obr. 4.14: Graf regresních funkcí pro všechny měřené teploty s naznačeným konfidenčním intervalem (95%)

### 4.1.2 | Ocel S235JR

Na Laboratoři přenosu tepla a proudění byla pro měření kvality odkujení k dispozici také ocel s označením S235JR (ČSN EN 1.0038; ČSN 11 375). Jedná se svařitelnou nelegovanou konstrukční ocel. Chemické složení této oceli uvádí tabulka 4.5.

Tab. 4.5: Chemické složení zkoumané oceli S235JR [7] [9]

Prvek	C	Mn	P	S	N	Cu
Složení [hm. %]	max 0,20	max 1,4	max 0,045	max 0,045	max 0,012	max 0,55

Tato ocel se ovšem během měření kvality odkujení jednotlivých konfigurací trysek neprokázala jako vhodná, neboť docházelo k odstranění celé vrstvy okují u všech experimentů a nebylo tedy možné porovnávat účinnost jednotlivých konfigurací mezi sebou. Viz navazující experiment Q405b měření kvality odkujení v kapitole 4.4. K této oceli proto tedy nebyla vyhotovena ani žádná analýza růstu jejich okují.

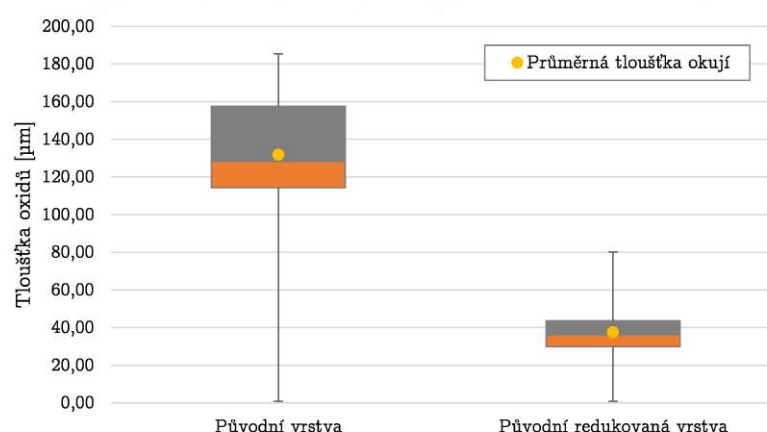
### 4.1.3 | Ocel HDT580X

Poslední ocelí, která byla na Laboratoři přenosu tepla a proudění k dispozici a která byla použita pro měření kvality odkujení konfigurací byla dvoufázová ocel HDT580X (ČSN EN 1.0936; ČSN 11 140). Chemické složení této oceli uvádí tabulka 4.6.

Tab. 4.6: Chemické složení zkoumané oceli HDT580X [9]

Prvek	C	Si	Mn	P	S	V	Al	B	Cr + Mo
Složení [hm. %]	max 0,17	max 0,8	max 2,2	max 0,08	max 0,015	max 0,2	max 2	max 0,005	<1

Tato ocel se ukázala jako vhodná pro měření kvality odkujení. Všechna měření kvality odkujení byla realizována pro teplotu 1 200 °C a čas oxidace 120 minut. Vzorky pro potřebnou analýzu struktury okují byly odebrány přímo z měřené desky a bylo vyhodnoceno několik oblastí na vzorku. Fotografie těchto struktur jsou uvedeny v příloze A.2. Byly pozorovány dvě oblasti výšky okují, oblast s větší tloušťkou a menší tloušťkou. U oblasti s menší tloušťkou okují se pravděpodobně jedná o případ, kdy se svrchní vrstva již odlomila. Tyto oblasti byly tedy vyhodnoceny samostatně. Krabicový graf výsledků je na obrázku 4.15. Vyšší část okují dosahovala v průměru tloušťky 132 µm, redukována 38 µm. Obě dvě oblasti měly i úzké trhliny, kde byla tloušťka okují minimální až nulová. Na tyto výsledky navazují experimenty Q406, Q511 a Q512 měření kvality odkujení v kapitolách 4.4 a 4.5.



Obr. 4.15: Krabicový graf tloušťky vrstvy okují oceli HDT580X po 120 minutách oxidace při teplotě 1 200 °C

#### 4.1.4 | Závěr výzkumného cíle

V rámci prvního cíle dizertační práce byly uvedeny 3 typy ocelí (54SiCr6, S235JR, a HDT580X).

První ocel 54SiCr6 byla podrobně analyzována na vznik okují v závislosti na teplotě a času oxidace (viz obrázek 4.14). Bohužel pro prokazatelná měření kvality odkujení se osvědčila pouze při teplotě do 1 000 °C, tedy pod teplotou vzniku fayalitu  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ . Při teplotě oxidace 1 200 °C se v měřeních kvality odkujení následně nepodařilo vytvořit souvislou homogenní vrstvu okují a docházelo ke vzniku tzv. plyskýřů. Tento jev byl pravděpodobně způsoben tím, že docházelo u vzorku po vyjmutí z pece ke styku s vlhkým prostředím. Analýza růstu okují prokázala, že výška okují roste s časem i zvyšující se teplotou. Změna struktury okují v závislosti na teplotě je vidět i na fotografiích pořízených mikroskopem v příloze A.1.3.

Ocel S235JR se v měřeních kvality odkujení také neprokázala jako vhodná a proto byla z podrobnější analýzy již předem vyřazena.

Proto byla analyzována struktura okují u oceli HDT580X, která se ukázala jako vhodná pro měření kvality odkujení. Byl vybrán vzorek okují z okraje desky, který byl oxidován po dobu 120 minut při teplotě 1 200 °C. Bylo ukázáno, že okuje se částečně odlupují. Vyšší část okují dosahovala v průměru tloušťky 132 μm, redukovaná 38 μm.

## 4.2 | Experimentální určení vlivu stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku vodního paprsku

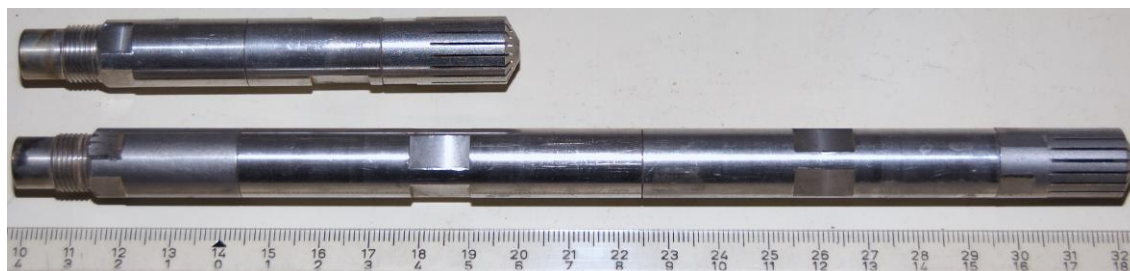
Druhý cíl dizertační práce navazuje na již dříve vzniklou dizertační práci [21] na Laboratoři přenosu tepla a proudění a článek [38]. Práce [21] zpracovávala vliv kolektoru a typu stabilizátoru na rozložení impaktního tlaku. Tento cíl rozšiřuje tuto problematiku o parametr délky samotného stabilizátoru.

### 4.2.1 | Výběr trysek

Pro tento účel byly vybrány dva typy trysek od dvou různých výrobců s odlišnými úhly rozstříku. Parametry jednotlivých trysek lze nalézt v tabulce 4.7. Ke každé trysce byly dodány dva typy stabilizátorů o rozdílné délce. K Trysce 2 byly k dispozici stabilizátory o celkové délce 101 mm a 225 mm. Provedení stabilizátorů ilustruje obr. 4.16. Zakončení stabilizátorů u Trysky 2 mělo tvar zkoseného kužele. K Trysce 4 byly k dispozici stabilizátory o celkové délce 121 mm a 130 mm. Provedení stabilizátorů ilustruje obr. 4.17. Zakončení stabilizátorů má tvar půlkoule a typově odpovídá konstrukci stabilizátoru typu B v dizertační práci [21].

Tab. 4.7: Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody

Označení trysky	Výrobce	Úhel rozstříku $\alpha_{nom}$ uváděný výrobcem [°]	Průtok vody tryskou při 10 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 20 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 40 MPa [l/min]	Průtok vody pro 20 MPa na stupeň [l/min/°]
Tryska 2	B	52	12,3	17,3	24,5	0,33
Tryska 4	A	30	18	25,46	36	0,84



Obr. 4.16: Stabilizátor pro Trysku 2





Obr. 4.17: Stabilizátor pro Trysku 4

### 4.2.2 | Impaktní tlak trysek

V rámci cíle dizertační práce byl zkoumán pouze vliv stabilizátoru na rozložení impaktního tlaku. Byly provedeny 4 měření dle postupu uvedeném v kapitole 3. Nastavení jednotlivých konfigurací shrnuje tabulka 4.8. Pro všechny experimenty byl zvolen jednotný tlak 20 MPa, který odpovídá obvyklé hodnotě užívané v průmyslu. Výška byla jednotně nastavena na 75 mm. Konfigurace s Tryskou 2 byla testována pod úhlem náklonu  $15^\circ$ , která se běžně používá v průmyslu. Konfigurace s Tryskou 4 byla testována pod úhlem náklonu  $0^\circ$ , kdy voda stříkala kolmo k povrchu. Obě konfigurace jsou graficky zobrazeny na obr. 4.18.

Tab. 4.8: Seznam experimentů I2XX a jejich výsledků

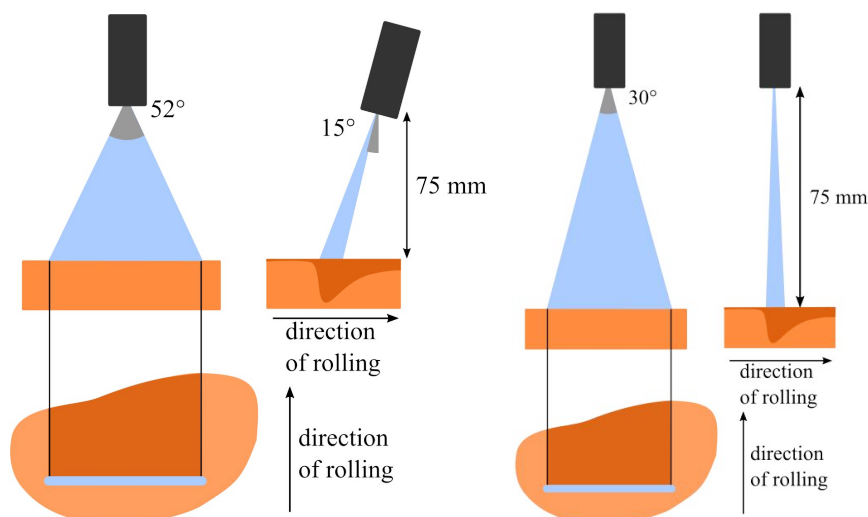
Měření	Tryska	Délka stabilizátoru [mm]	Tlak [MPa]	Výška [mm]	Úhel natočení [ $^\circ$ ]	Úhel náklonu [ $^\circ$ ]	Šířka stopy [mm]	Průměrný maximální impaktní tlak [MPa]	Hloubka stopy paprsku [mm]
I201	2	101	20	75	0	15	67	0,63	1,75
I202	2	225	20	75	0	15	68,5	0,70	1,56
I203	4	121	20	75	0	0	47,5	1,96	1,75
I204	4	130	20	75	0	0	47,5	2,04	1,68

### Výsledky měření

U obou trysek bylo pozorováno zlepšení fokusace vodního paprsku a nárůst průměrné hodnoty profilu maximálního tlaku.

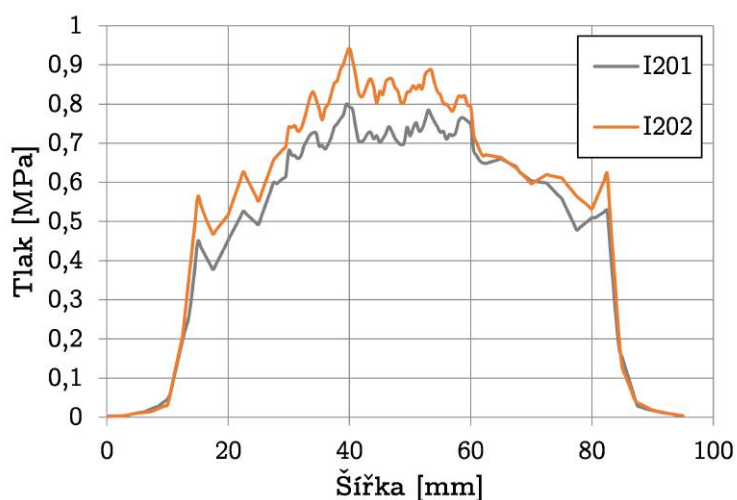
U Trysky 2 se jednalo o zlepšení z průměrné hodnoty 0,63 MPa na 0,7 MPa, tedy o 11 %. Tento rozdíl je zobrazen v grafu na obr. 4.19. Došlo zároveň k mírnému





Obr. 4.18: Schéma nastavení pro Trysku 2 (vlevo) a 4 (vpravo)

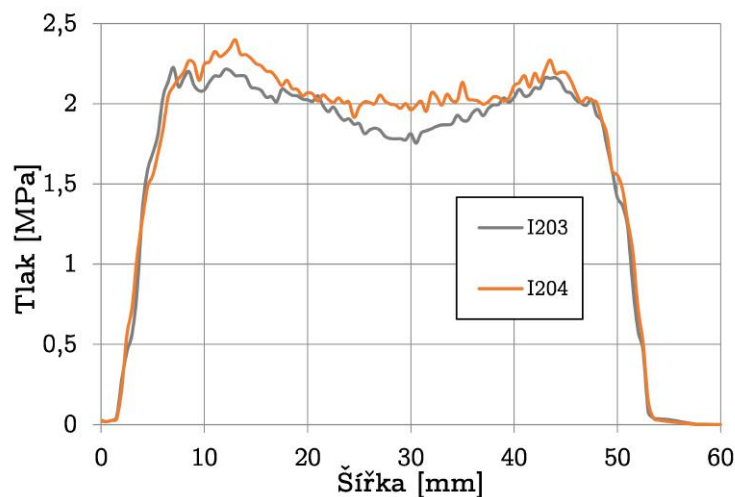
rozšíření šířky stopy trysky. Toto rozšíření je ovšem do značné míry způsobeno metodikou vyhodnocení, kdy je šířka stopy určena relativně ku maximálnímu měřenému tlaku. Střední úsek stopy trysky byl pro účely analýzy hloubky paprsku scanován podrobněji, okraje pak v hrubším rastru. Hodnota hloubky stopy paprsku udává hloubku pásu, kde je registrováno 95% impaktního tlaku. Zde došlo u Trysky 2 ke zlepšení z 1,75 mm na 1,56 mm.



Obr. 4.19: Impaktní profil Trysky 2 při použití dvou různých stabilizátorů

Nerovnoměrné rozložení tlaku dané trysky ovšem ukázalo, že se jedná o nevhodný typ trysky pro další studium, neboť tryska nevytváří vhodný konstantní profil a ani se mu neblíží. Od Trysky 2 byly dodány 2 ks a oba dva vykazovaly zvýšený impaktní tlak ve středu stopy. Je tedy možné se domnívat, že se jedná o konstrukční problém trysek a nejedná se o defekt jediného kusu.

U Trysky 4 se jednalo o zlepšení z průměrné hodnoty 1,96 MPa na 2,04 MPa, tedy o 4 %. Tento rozdíl lze vidět v grafu na obr. 4.20. Tryska již vytváří profil, který se blíží konstantnímu. Delší stabilizátor dokonce vyrovnal pokles tlaku ve středu stopy. Z hlediska hloubky stopy paprsku došlo ke zlepšení z 1,75 mm na 1,68 mm.



Obr. 4.20: Impaktní profil Trysky 4 při použití dvou různých stabilizátorů

#### 4.2.3 | Závěr výzkumného cíle

U obou trysek byla v rámci porovnávaných experimentů téměř totožná síla působící na měřicí podložku, což potvrzuje předpoklad, že delší stabilizátory přispívají k lepší fokusaci vodního paprsku a tím i k lepší mechanické efektivitě odstraňování okují. Tyto výsledky byly prezentovány v příspěvku [A7] na konferenci METAL 2016. Graficky zpracované výsledky jednotlivých měření lze nalézt v příloze B.

## 4.3 | Obrazová analýza struktury vodního paprsku

Třetí cíl dizertační práce se zabývá analýzou struktury vodního paprsku pomocí stínografické metody. Tento přístup zatím nebyl v rámci výzkumu trysek s plochým paprskem nijak aplikován a je tedy ve velmi raných fázích vývoje. Na základě simulací v článku [5] lze předpokládat, že velikost a struktura kapek může mít výrazný vliv na mechanický i teplotní aspekt při odstraňování okují.

### 4.3.1 | Výběr trysek

V rámci tohoto cíle bylo použito 6 různých typů trysek dle tabulky 4.9.

Tab. 4.9: Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody

Označení trysky	Výrobce	Úhel rozstříku $\alpha_{nom}$ uváděný výrobcem [°]	Průtok vody tryskou při 10 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 20 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 40 MPa [l/min]	Průtok vody pro 20 MPa na stupeň [l/min/°]
Tryska 1	A	40	12	17	24	0,43
Tryska 2	B	52	12,3	17,3	24,5	0,33
Tryska 4	A	30	18	25,46	36	0,84
Tryska 5	C	45	29	41	58	0,91
Tryska 6	A	40	28	39,6	56	0,99
Tryska 8	A	22	36	50,9	72	2,31

Tryska 1 a Tryska 2 byly vybrány v páru, neboť představují velmi podobný typ trysky s plochým vodním paprskem od dvou různých výrobců. Rozdílný úhel rozstříku je kompenzován vzájemnou změnou výšky příslušné trysky tak, aby byl srovnatelný průtok vody na jeden milimetr šířky stopy vodního paprsku. Podobný přístup je aplikován i u srovnávaných trysek Trysky 5 a Trysky 6.

Tryska 8 má výjimečně malý úhel rozstříku, který umožňuje velký rozsah měřených výšek pro stínografickou fotografii a poskytuje tak nejvíce informací o vývoji struktury paprsků v rámci jednoho typu trysky. Tryska 4 je pak prezentována pouze okrajově v sekci měření impaktních tlaků.

### 4.3.2 | Analýza stínografické fotografie

Stínografické fotografie struktury vodního paprsku byly pořízeny v rámci spolupráce s Ústavem Geoniky AV ČR. Bylo pořízeno 89 fotografií struktur vodního paprsku dle postupu uvedeném v kapitole 3. Seznam vybraných analyzovaných struktur je uveden v tabulce 4.10. Většina fotografií byla pořízena při pracovním tlaku 20 MPa. Fotografie F301a až F313 jsou párovány s měřeními impaktního tlaku v daném místě a příslušným součinitelem přestupu tepla. Analyzované výšky byly určeny tak, aby bylo možné porovnávat jak chování paprsku v rámci jedné trysky, tak mezi tryskami při zohlednění průměrného průtoku vody na mm šířky stopy. U většiny fotografií je analyzována oblast o výšce 6 mm v odpovídající uvedené výšce (pokud tento pás přesahuje snímanou oblast, pak je vybrána oblast užší než 6 mm).

Tryska 1 je analyzována ve třech výškách: 54, 82 a 108 mm. Výška 82 mm je analyzována na dvou fotografiích, které jsou označeny příslušnými dodatkovými písmeny. Tryska 2 je analyzována ve dvou výškách: 78 a 104 mm. Ve vyšší pozici pak pro tlak 20 MPa a 40 MPa. Trysky 1 a 2 mají srovnatelný průtok vody na jeden milimetr šířky stopy vodního paprsku u fotografií F302a, F302b, F304 a F306 a u fotografií F303 a F305.

Tryska 5 je analyzována ve třech výškách: 96, 110 a 124 mm. Tryska 6 je analyzována ve dvou výškách: 89 a 114 mm. Trysky 5 a 6 mají srovnatelný průtok vody na jeden milimetr šířky stopy vodního paprsku u fotografií F307, F311 a u fotografií F309 a F312.

Tryska 8 je analyzována pouze ve výšce 104 mm. Jedná se o trysku s největším průtokem na jeden milimetr šířky stopy.

Protože zařízení pro pořizování stínografických fotografií mělo omezený průměr vstupního otvoru pro zachytávání vody, byla omezena i možnost snímání u řady trysek s širokým úhlem rozstříku. Tryska 8 byla vybrána pro kompletní scanování struktury vodního paprsku od výšky 40 mm až po výšku 222 mm. Fotografie F314 (resp. F315) představují set 9 fotografií struktury vodního paprsku pro tlak 10 MPa (resp. 20 MPa).

Fotografie byly zpracovány pomocí skriptu, který byl vyvinut v rámci dizertační práce a který je prezentován v příloze C. Skript data importuje a ořeže dle požadované analyzované sekce. Fotografie je poté převedena do binární podoby pomocí metody adaptivního prahování<sup>2</sup>. Bylo určeno, kolik procent obrazu bylo zabráno vodními celky. V binárním obraze byly následně identifikovány jednotlivé samostatně rozlišitelné celky a jejich okolní hranice. Graficky jsou pak ve výstupu jednotlivé

---

<sup>2</sup>K pořízeným fotografiím byla k dispozici i fotografie samotného pozadí. Metoda adaptivního prahování měla ovšem lepší úspěšnost při rozlišitelnosti jednotlivých celků než přístup, kdy bylo z původní fotografie napřed odečteno pozadí a až poté byla fotografie analyzována prahováním.

Tab. 4.10: Seznam vybraných stínografických fotografií F3XX a jejich výsledků

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Analyzovaná výška [mm]	Průtok vody na mm šířky stopy [l/(min·mm)]	Snímaný úsek od čela trysky [mm]	Analyzovaný úsek od čela trysky [mm]	Procento vody v obraze [%]	Počet identifikovaných celků v obraze na mm [-]
F301	1	20	54	0,390	40–62	51–57	0,552	137
F302a	1	20	82	0,255	60–82	79–82	0,497	252,3
F302b	1	20	82	0,255	80–102	80–85	0,534	233,8
F303	1	20	108	0,184	100–122	105–111	0,512	250,6
F304	2	20	78	0,253	60–82	75–81	0,524	204
F305	2	20	104	0,187	100–122	101–107	0,529	251
F306	2	40	104	0,265	100–122	101–107	0,558	209
F307	5	20	96	0,536	80–96	93–96	0,537	445
F308	5	20	110	0,463	100–116	107–113	0,560	355
F309	5	20	124	0,412	120–136	121–127	0,533	649
F310	5	40	124	0,586	120–136	121–127	0,602	559
F311	6	20	89	0,521	80–102	86–92	0,630	119
F312	6	20	114	0,424	100–122	111–117	0,596	155
F313	8	20	104	1,119	100–122	101–107	0,745	64
F314	8	10	-	-	40–222	-	-	-
F315	8	20	-	-	40–222	-	-	-

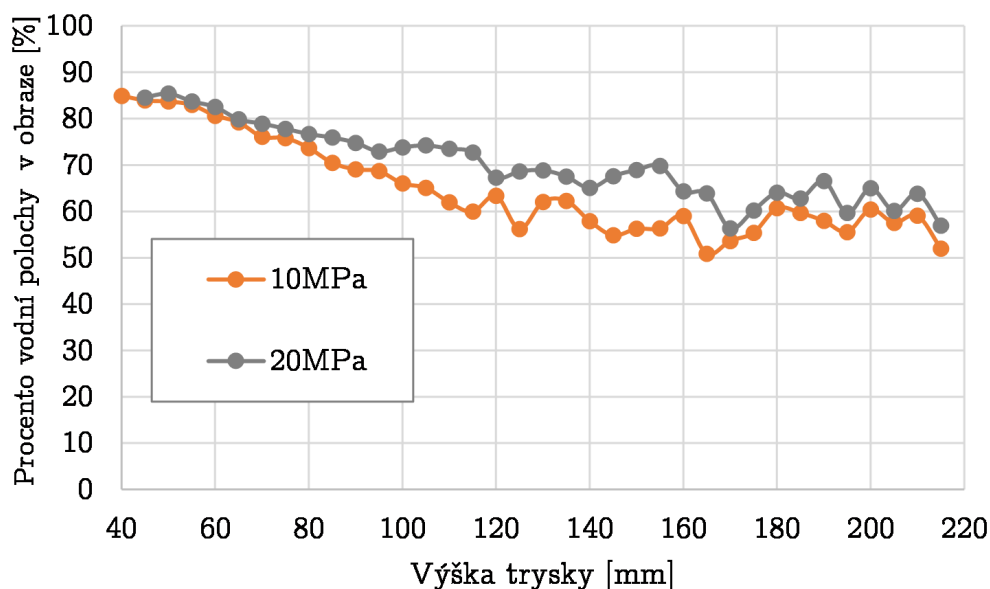
celky odděleny barevně. Celý postup ilustruje graficky i obrázek 4.21. Počet identifikovaných celků byl podělen příslušnou velikostí analyzované části v milimetrech. Tímto parametrem je pak možné porovnat různě velké analyzované sekce.



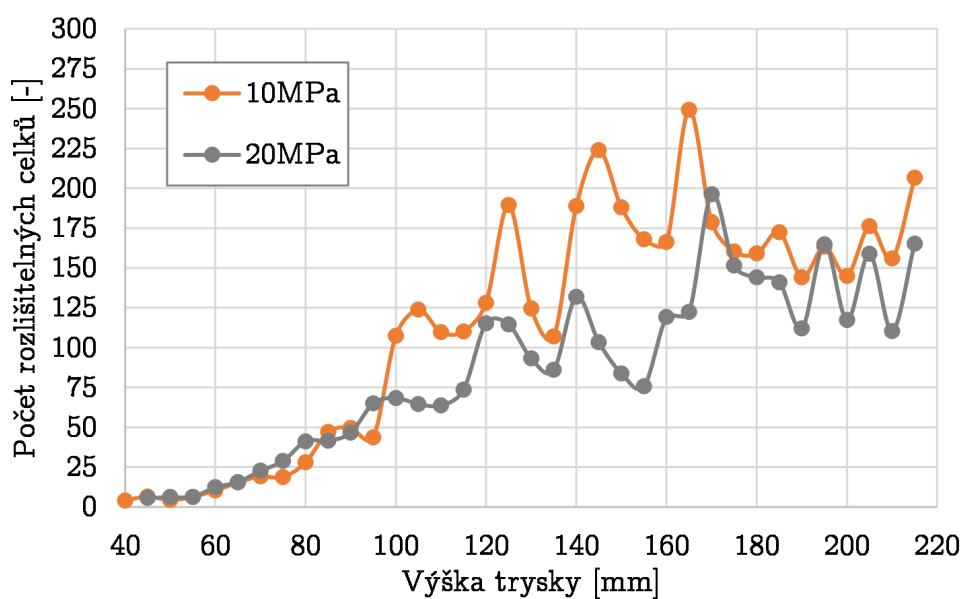
Obr. 4.21: Postup při zpracování obrazu: původní obraz, binární obraz, obraz s barevně rozlišenými vodními celky

Výsledky analýzy pro Trysku 8 jsou uvedeny v grafech na obrázcích 4.22 a 4.23.

Fotografie jsou analyzovány ve výřezech o výšce 5 mm. Vypočítaný počet identifikovaných vodních celků je tedy u každého výřezu dělen 5. Z výsledků se potvrdilo, že procento identifikované vody v obraze klesá, což je logický důsledek faktu, že se zvyšující se výškou trysky klesá i procento šířky, kterou fotografie zabírá.



Obr. 4.22: Závislost pozorovaného procenta vodních celků na výšce trysky u Trysky 8



Obr. 4.23: Závislost průměrného počtu rozlišitelných celků v 1 milimetru výšky obrazu na výšce trysky u Trysky 8

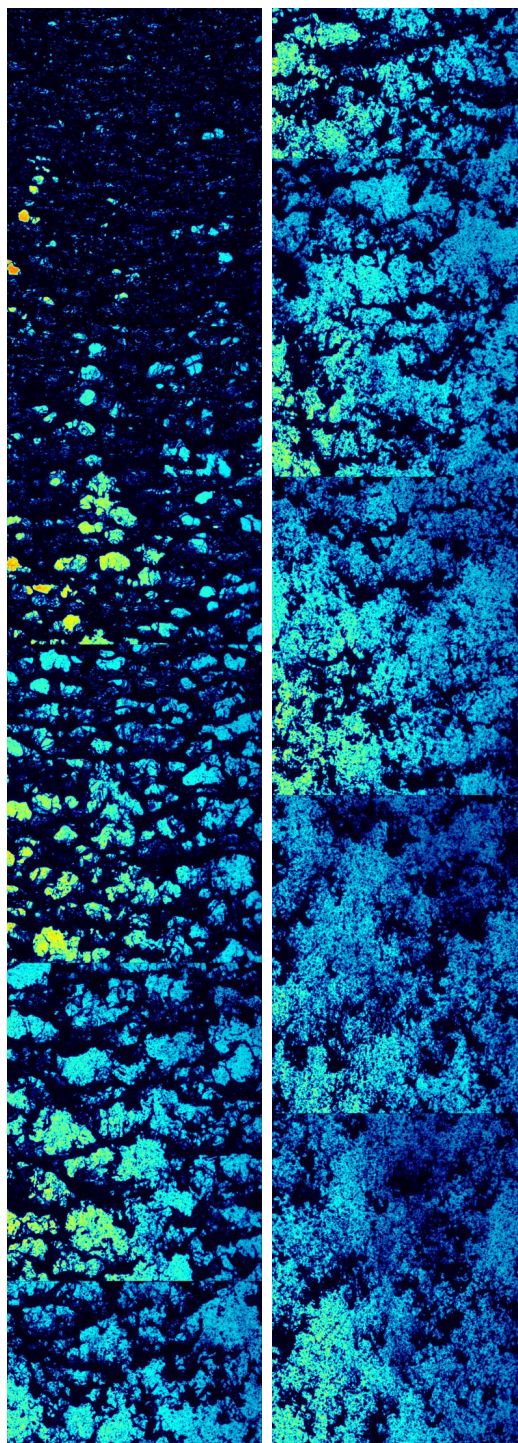


Průměrný počet rozlišitelných celků v obraze s výškou postupně roste. Od určité výšky lze pozorovat nárůst překryvů vodních celků a algoritmus již nedokáže oddělit některé překrývající se vodní celky. Tím dochází ke značné rozkolísanosti parametru průměrného počtu rozlišitelných celků. Vodní paprsek se rozpadá na velmi drobné kapky.

Tuto komplexní strukturu ukazuje obrázek 4.24 složený ze stínografických fotografií F315. Obrázek je složen z 9 samostatných fotografií, které jsou seřazeny dle výšky nad sebou. Z důvodu velkého poměru šířky a výšky je celý obrázek rozdělen na dva na sebe navazující celky. Levá část ukazuje strukturu paprsku v úseku 40–131 mm. Pravá část ukazuje strukturu paprsku v úseku 132–222 mm. K rozpadu vodních celků na velmi drobné kapky dochází právě v oblasti 110–130 mm. Při nižším tlaku 10 MPa k tomuto rozpadu dochází již v oblasti 90–110 mm. Toto pozorování odpovídá i náhlé změně v počtu rozlišitelných celků v grafu 4.23. Strukturu paprsku v závislosti na výšce tedy lze tedy rozdělit na 3 úseky

1. úsek kompaktní struktury (do 100 vodních celků v 1 milimetru výšky obrazu),
2. úsek postupného rozpadu této struktury,
3. úsek vodního paprsku tvořeného drobným kapičkami.

Z dat lze soudit, že výška úseku, kde se kompaktní struktura rozpadá, může záviset na pracovním tlaku trysky (resp. na velikosti průtoku vody tryskou). Pro obecný závěr je však třeba realizovat více pozorování.



Obr. 4.24: Složené sténografické fotografie vodního paprsku Trysky 8 od výšky 40 mm do 222 mm při tlaku 20 MPa; fotografie rozdělena na poloviny z důvodu velké délky

U ostatních trysek v experimentech F301 až F313 bylo ovšem velmi obtížné identifikovat tuto hranici, kdy dochází k degradaci kompaktní struktury vodního paprsku. Tabulka 4.10 uvádí výsledky analýzy jednotlivých výřezů z fotografií. Samotné zpracované fotografie jsou uvedeny u každého experimentu v příloze C. Obecně lze říci, že s rostoucí výškou klesá opět pozorované procento vodních celků. Výjimkou byly pouze výřezy F302a a F307, kde byl analyzován okraj fotografie a rozlišitelnost vodního celku od pozadí byla horší. Počet rozlišitelných celků v obraze se obecně velmi lišil. U výřezů F301 až F312 byl průměrný počet rozlišitelných celků v 1 milimetru výšky obrazu nad 100 celků. U všech těchto výřezů se jedná již o úsek, kde je struktura paprsku již zcela rozpadena na drobné kapky. Pouze u analýzy výřezu fotografie F313 se ukázalo, že lze vodní paprsek v této výšce stále považovat za částečně kompaktní.

### 4.3.3 | Impaktní tlak trysek

Pro přesnější vysvětlení této komplexní problematiky bylo ke každé vyhodnocované výšce trysky zkoumáno i rozložení impaktního tlaku dané trysky. Všechny experimenty jsou uvedeny s příslušnými výsledky v tabulkách 4.11 a 4.12. Výsledky rozložení tlaku jsou prezentovány v příloze C.

Tab. 4.11: Seznam experimentů I3XX a jejich výsledků (1. část)

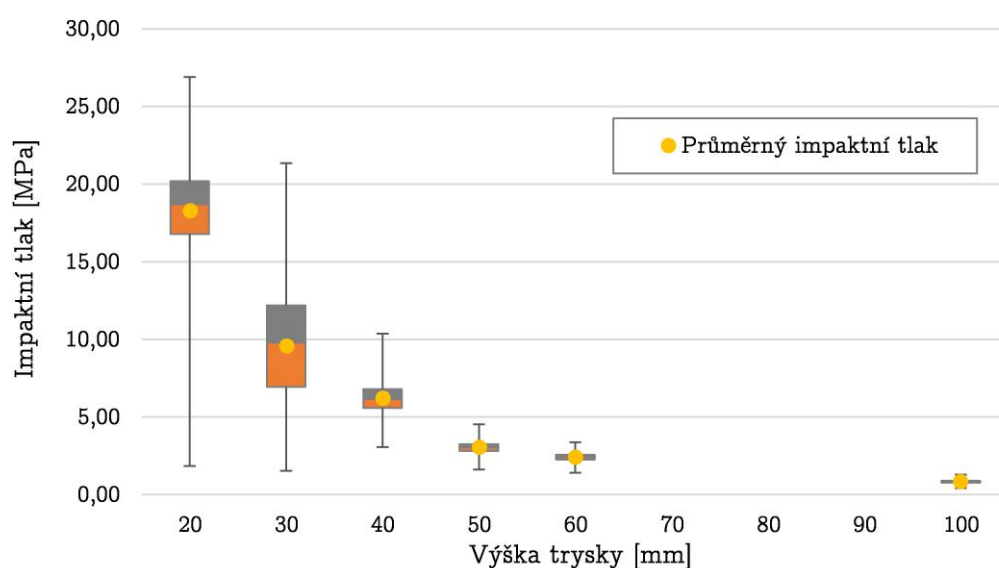
Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Výška [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Šířka stopy [mm]	Průměrný maximální impaktní tlak [MPa]	Hloubka stopy paprsku [mm]
I301	1	20	52	0	15	43,5	1,53	1,31
I302	1	20	79	0	15	66,5	0,63	1,86
I303	1	20	105	0	15	92	0,34	2,38
I304	2	20	75	0	15	68,5	0,70	1,56
I305	2	20	100	0	15	92,5	0,34	2,35
I306	2	40	100	0	15	92,5	0,75	2,12
I307	5	20	93	0	15	76,5	1,07	2,54
I308	5	20	106	0	15	88,5	0,80	2,80
I309	5	20	120	0	15	99,5	0,64	3,05
I310	5	40	120	0	15	99	1,38	2,75



Tab. 4.12: Seznam experimentů I3XX a jejich výsledků (2. část)

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Výška [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Šířka stopy [mm]	Průměrný maximální impaktní tlak [MPa]	Hloubka stopy paprsku [mm]
I311	6	20	86	0	15	76	1,24	2,25
I312	6	20	110	0	15	93,5	0,78	2,52
I313	8	20	100	0	15	45,5	2,98	2,37

Mimo tato standardní měření, která byla realizována na Laboratoři přenosu tepla a proudění, byly provedeny i experimenty měření impaktního tlaku v rámci spolupráce s Ústavem Geoniky AV ČR. Zařízení na Ústavu geoniky bylo schopno registrovat změnu tlaku až 200 000 za sekundu a tím lépe zachytí tlakovou dynamiku při dopadu vodního paprsku na povrch. V rámci spolupráce byl analyzován impaktní tlak Trysky 4 při pracovním tlaku 20 MPa. Měřící místo se nacházelo na středu impaktní stopy, kde je registrován největší impaktní tlak. Výšky Trysky 4 byly nastaveny na 20, 30, 40, 50, 60 a 100 mm. V každé výšce bylo realizován minimálně jeden experiment s minimálně 100 000 vzorky. Pro každý experiment byla spočtena průměrná hodnota registrovaného tlaku, kvartily, maximum, minimum a rozpětí hodnot. Výsledky analýzy uvádí graf na obrázku 4.25.



Obr. 4.25: Impaktní tlak Trysky 4 při pracovním tlaku 20 MPa v závislosti na výšce trysky

Experimenty ukázaly, že u této trysky byly registrovány velké tlakové rázy, pokud byla tryska nastavena ve výšce 20 až 40 mm od ostříkávaného povrchu. Pro vyšší výšky tyto rázy byly postupně menší a menší. Pro výšku 100 mm byl rozptýl hodnot již minimální. Tento výsledek opět ukazuje, že pravděpodobně dochází ke změně struktury vodního paprsku. U Trysky 4 nebylo bohužel snímkování pomocí stínografické fotografie provedeno a tato informace o struktuře tedy chybí. Nelze tedy udělat přesnější analýzu struktury paprsku a tvrzení zůstává pouze v rovině domněnky.

#### 4.3.4 | Součinitel přestupu tepla

V návaznosti na předchozí experimenty bylo realizováno 14 experimentů určujících průběh součinitele přestupu tepla pro jednotlivé vybrané konfigurace. Seznam experimentů a jejich výsledků je uveden v tabulce 4.13. Experimenty byly provedeny dle postupu popsáném v kapitole 3.

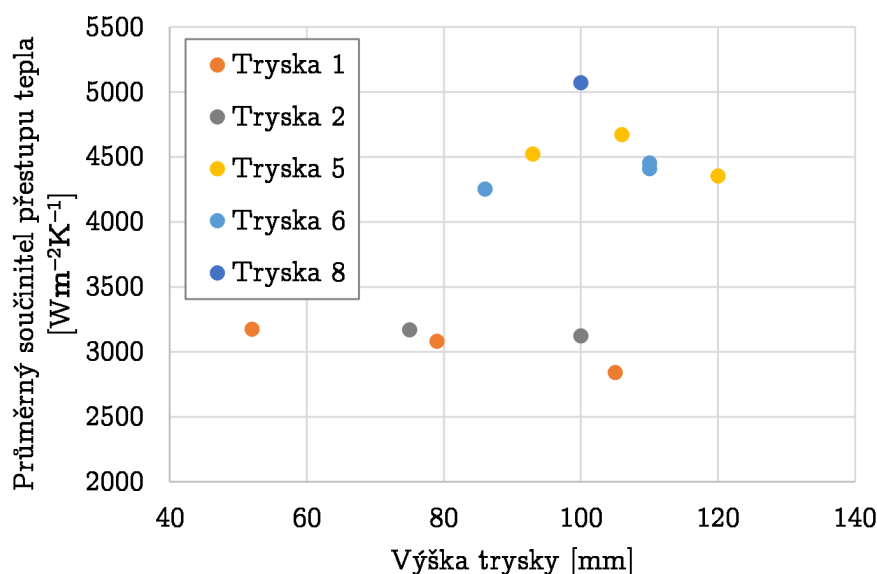
Tab. 4.13: Seznam experimentů H3XX a jejich výsledků

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Výška [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Průtok vody na mm šířky stopy [l/(min·mm)]	Rychlost vzorku [m/s]	Teplota [°C]	Průměr součinitele přestupu tepla [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
H301	1	21	52	0	15	0,400	2	900	3173
H302	1	21	79	0	15	0,261	2	900	3080
H303	1	21	105	0	15	0,189	2	900	2840
H304	2	20.5	75	0	15	0,256	2	900	3169
H305	2	20.5	100	0	15	0,190	2	900	3122
H306	2	40	100	0	15	0,265	2	900	3711
H307	5	20	93	0	15	0,536	2	900	4522
H308	5	20	106	0	15	0,463	2	900	4673
H309	5	20	120	0	15	0,412	2	900	4352
H310	5	40	120	0	15	0,586	2	900	5352
H311	6	20	86	0	15	0,521	2	900	4252
H312	6	20	110	0	15	0,424	2	900	4454
H312r	6	20	110	0	15	0,424	2	900	4408
H313	8	20	100	0	15	1,119	2	900	5071

Pro všechny experimenty byla nastavena jednotná teplota ohřevu 900 °C. Při výpočtu průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy trysky byl použit odhad průtoku vody dle katalogového listu trysky. Šířka stopy trysky byla stanovena experimentálně z měření impaktního tlaku. Podrobnější průběhy součinitele přestupu tepla pro každý experiment jsou pak uvedeny v příloze C.

U experimentů H301 až H305 došlo při měření k systematické odchylce, kdy byl pracovní tlak nastaven o zhruba 1 MPa (resp. 0,5 MPa) výše, než byla plánovaná hodnota. Tato systematická chyba se pohybuje v intervalu do 5 % a týká se všech měření Trysky 1 a 2 a nedochází tak k zkreslení vyhodnocených dat v rámci podskupiny měření.

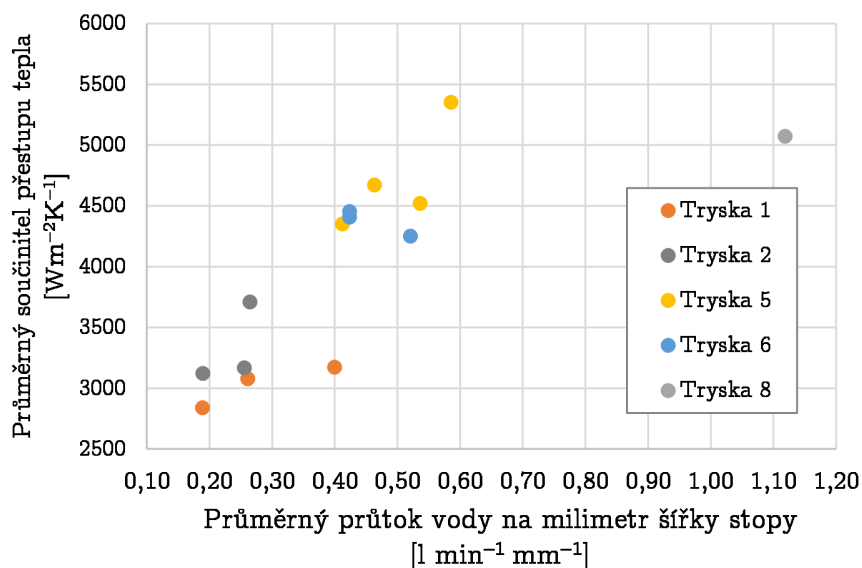
Graf 4.26 ukazuje závislost průměrného součinitele přestupu tepla na výšce příslušné trysky při tlaku 20 MPa (resp. 21 MPa). Průměrný součinitel přestupu tepla je veličina, která se vypočítá jako průměrná hodnota úseku mezi pozicí –50 a 50 mm. Z výsledků je vidět, že nelze stanovit obecný závěr, že se změnou výšky trysky dochází ke snížení/zvýšení průměrného součinitele přestupu tepla. Experimenty H312 a H312r u Trysky 6 jsou experimenty, které ukazují opakované měření stejné konfigurace za stejných podmínek, poskytuje velmi podobné výsledky (modré body těsně nad sebou v grafu).



Obr. 4.26: Graf závislosti průměrného součinitele přestupu tepla na výšce trysky při tlaku 20 MPa (resp. 21 MPa)

Graf 4.27 ukazuje závislost průměrného součinitele přestupu tepla na průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy vodního paprsku. Tento parametr mimo výšku trysky zohledňuje i úhel rozstříku a průtok trysky a umožňuje výsledky jednotlivých experimentů porovnávat mezi sebou. Trysky 1, 2, 5 a 6 popisují oblast průtoků od 0,17

do  $0,60 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$ . Tryska 8 reprezentuje průtoky vyšší, průměrný součinitel přestupu tepla je ovšem nižší, než by se dalo předpokládat s ostatních experimentů.



Obr. 4.27: Graf závislosti průměrného součinitele přestupu tepla na průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy vodního paprsku

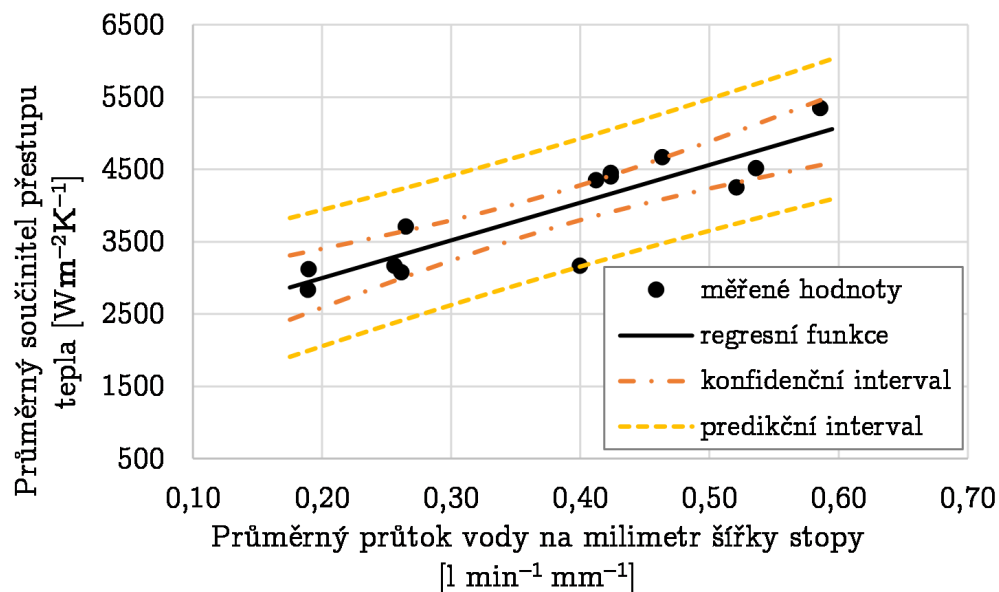
Z analýzy stínografických fotografií v předchozí části ukázaly, že v případě Trysek 1, 2, 5 a 6 při experimentech F301 až F312 dochází při všech výškách trysek (resp. průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy) k úplnému rozpadu struktury vodního paprsku a vodní paprsek lze v této oblasti charakterizovat jako vodní masu složenou z velmi velkého počtu drobných kapek. Experiment F313 naopak naznačil, že struktura paprsku Trysky 8 byla stále v kompaktnější fázi.

Pro případ rozpadu struktury na drobné vodní kapičky lze výsledky 13 experimentů Trysek 1, 2, 5 a 6 vzájemně korelovat. Graf na obrázku 4.28 ukazuje výsledky regresní analýzy této skupiny experimentů. Černou barvou jsou označeny jednotlivá měření a příslušná regresní funkce. Oranžové meze určují oblast konfidenčního intervalu, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet i skutečný výsledek regresní funkce. Žlutě je označen predikční interval, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet libovolné další měření, které bude provedeno za stejných podmínek, jako měření určující danou regresní funkci.

Průměrný součinitel přestupu tepla pro tuto skupinu měření lze vyjádřit v závislosti na průtoku a šířce stopy tryšky následující regresní rovnicí

$$h_p = 5\,215,9 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} + 1\,954,8 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right],$$

kde  $Q_{exp}$  označuje vypočítaný průtok tryskou při experimentálně nastaveném tlaku  $p_{exp}$  a  $l_{exp}$  označuje experimentálně změřenou šířku stopy vodního paprsku. Tato regresní rovnice popisuje přibližně 75 % variability této skupiny 13 experimentů.



Obr. 4.28: Graf regresní závislosti průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky

Experiment H313 Trysky 8 naznačuje, že závislost průměrného součinitele přestupu tepla může záviset na míře rozpadu kompaktního paprsku na menší kapky. Z jednoho experimentu však nelze vyvodit obecné závěry a v této oblasti bude třeba realizovat další výzkum.

#### 4.3.5 | Závěr výzkumného cíle

Analýza fotografií pořízených stínografickou metodou ukázala, že s rostoucí výškou se struktura paprsku mění a lze rozlišit 3 úseky se 3 strukturami vodního paprsku: úsek s kompaktní strukturou paprsku, úsek postupného rozpadu této struktury a úsek, kdy je již struktura vodního paprsku tvořena pouze drobnými kapkami. Ukázalo se, že pro většinu trysek s velkým úhlem rozstříku a nižším průtokem dochází k rozpadu kompaktní struktury velmi záhy u ústí trysky. Ve standardní výšce, která je používána u descalingových trysek (50–200 mm), u Trysek 1, 2, 5 a 6 již došlo k částečnému či úplnému rozpadu kompaktnosti struktury.

Měření variability impaktních tlaků u Trysky 4 ukázalo, že v úseku výšky 20–50 mm dochází k velké variabilitě tlakových pulzů, které jsou pro vyšší nastavení výšky rychle redukovány. Toto pozorování může souviset s již zmíněným rozpadem struktury vodního paprsku.

Experimenty pro určení součinitele přestupu tepla ukázaly, že předpokládaný průměrný součinitel přestupu tepla se může lišit dle struktury vodního paprsku. Pro případy, kdy k rozpadu vodního paprsku, byla provedena regresní diagnostika, která je detailně uvedena výše.

## 4.4 | Studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků

Čtvrtý cíl práce se zaměřuje především na oblast překryvu trysek a tvorbu tzv. washoutu<sup>3</sup>, kde dochází k redukci tlaku z důvodu interference trysek. Jako hlavní faktory ovlivňující tuto oblast jsou vybrány tlak trysky a tzv. přesazení trysek. Obrázek 4.29 ilustruje zcela obecnou konfiguraci trysek, parametr přesazení trysek je označen  $S$ . Tlak, při kterém pracují trysky, je tou nejsnáze měnitelnou veličinou, kterou lze v rámci optimalizace celého procesu měnit, a je proto důležité analyzovat, zda se změnou tlaku zároveň nerozšiřuje i oblast tzv. washoutu. Přesazení trysek ve směru válcování je čistě laboratorní koncept, který usnadňuje rozšíření či redukování části washoutu a vytvoří tak lineární nárůst tlaku na dostatečně dlouhém úseku, který bude vhodný pro verifikaci, zda na tomto úseku může docházet i k horší odkujitelnosti povrchu.

V první části kapitoly je představen jednoduchý geometrický model, který na základě proměnných vstupujících do procesu odhaduje šířku oblasti washoutu. Teoretickou část doplňuje praktická část s výsledky experimentů impaktních tlaků u navržených konfigurací trysek. Tyto výsledky jsou statisticky zpracovány a vybrané konfigurace jsou testovány na kvalitu odkujení, která je prezentována na konci kapitoly.

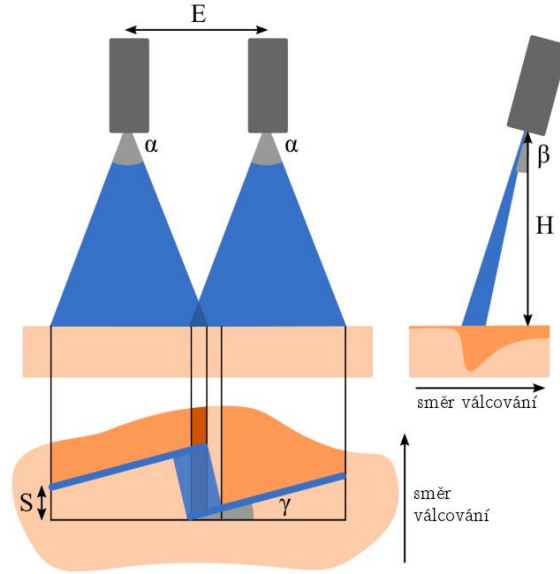
### 4.4.1 | Geometrický model

Geometrický model slouží k podrobné analýze hlavních faktorů, které mají na šířku oblasti dominantní vliv. Do modelu jsou obecně zahrnuty všechny geometrické parametry nastavení a všechny konstrukční parametry trysky, model lze tedy zevšeobecnit pro libovolný typ trysek s plochým paprskem.

Zavedeme standardní označení konfigurace trysek dle obrázku 4.29. Umístíme počátek pravotočivé soustavy souřadnic  $[0,0,0]$  do ústí trysky. Tryska z počátku stříká s úhlem  $\alpha$  v rovině  $xz$  na povrch oceli, který reprezentuje rovina  $z = -H$ . Úhel náklonu trysky  $\beta$  a natočení  $\gamma$  uvažujeme nulový. Levý a pravý okraj trysky tedy dopadají na povrch oceli v bodech  $A_1$  a  $A_2$ .

---

<sup>3</sup>Tento termín byl převzat z angličtiny, kde se běžně v zahraniční literatuře vyskytuje. V textu dizertace je toto označení ponecháno, neboť český ekvivalent tohoto termínu neexistuje a český překlad tohoto slova by byl více než jednoslovný a jeho použití by výrazně snížilo srozumitelnost práce.



Obr. 4.29: Standardní označení konfigurace trysek

$$A_1 = \begin{bmatrix} -H \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2}) \\ 0 \\ -H \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} H \operatorname{tg}(\frac{\alpha}{2}) \\ 0 \\ -H \end{bmatrix}$$

Úhel náklonu trysky  $\beta$  realizuje otočení trojúhelníku v ose otáčení  $x$  a matice rotace je:

$$\operatorname{Rot}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ 0 & \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Úhel natočení trysky  $\gamma$  realizuje otočení trojúhelníku v ose otáčení  $z$  a matice rotace je:

$$\operatorname{Rot}_z = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Protože matice rotace nejsou komutativní, je třeba dodržet stejné pořadí nastavení trysky jako při jejím samotném měření. Při nastavování trysek se nejprve nastavuje úhel natočení  $\gamma$ , poté je nastaven úhel  $\beta$ . Body  $A_1$  a  $A_2$  se tedy transformují do pozic  $B_1$  a  $B_2$  následovně:

$$B_1 = \operatorname{Rot}_x \cdot \operatorname{Rot}_z \cdot A_1; \quad B_2 = \operatorname{Rot}_x \cdot \operatorname{Rot}_z \cdot A_2$$

Body  $B_1$  a  $B_2$  se dostávají konkrétně do pozic:

$$B_1 = H \begin{bmatrix} -\cos(\gamma) \tan(\alpha/2) \\ -\cos(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) + \sin(\beta) \\ -\sin(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) - \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

$$B_2 = H \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \tan(\alpha/2) \\ \cos(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) + \sin(\beta) \\ \sin(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) - \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Tyto body však představují pouze směry vektorů  $v_{B_1}$  a  $v_{B_2}$ , které reprezentují okraje trysky. Pro nalezení okraje stopy trysky je třeba vektory násobit takovým násobkem, aby poslední pozice vektoru byla rovna  $-H$ , tedy povrchu chlazené oceli. Okraje stopy trysky označíme  $C_1$  a  $C_2$  a jsou rovny:

$$C_1 = \begin{bmatrix} \frac{\cos(\gamma)H \tan(\alpha/2)}{\sin(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) - \cos(\beta)} \\ \frac{\cos(\beta) \sin(\gamma)H \tan(\alpha/2) + \sin(\beta)H}{\sin(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) - \cos(\beta)} \\ -H \end{bmatrix}; \quad C_2 = \begin{bmatrix} -\frac{\cos(\gamma)H \tan(\alpha/2)}{\sin(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) - \cos(\beta)} \\ -\frac{\cos(\beta) \sin(\gamma)H \tan(\alpha/2) + \sin(\beta)H}{\sin(\beta) \sin(\gamma) \tan(\alpha/2) - \cos(\beta)} \\ -H \end{bmatrix}$$

Nadále pokračuje výpočet v rovině povrchu oceli  $z = -H$ . Body  $C_1$  a  $C_2$  představují levý a pravý okraj stopy trysky. Vektor stopy trysky  $\vec{v}$  je roven:

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} \frac{2H \cos(\gamma) \cos(\beta) \sin(\alpha)}{((-1+\cos(\alpha))(\cos(\beta))^2 - \cos(\alpha)+1)(\cos(\gamma))^2 + 2(\cos(\beta))^2 + \cos(\alpha)-1}} \\ \frac{2H \sin(\gamma) \sin(\alpha)}{((\cos(\beta))^2 \cos(\alpha) - (\cos(\beta))^2 - \cos(\alpha)+1)(\cos(\gamma))^2 + 2(\cos(\beta))^2 + \cos(\alpha)-1}} \end{bmatrix}$$

Pokud vypočteme úhel  $\gamma'$ , který stopa trysky svírá s osou  $x$  v rovině  $z = -H$ , dostaneme výraz:

$$\tan(\gamma') = \frac{\tan(\gamma)}{\cos(\beta)}$$

Úhel  $\gamma'$  se tedy od původního nastavení  $\gamma$  liší. Z důvodu provozních a měřicích podmínek se ovšem úhel  $\gamma$  uvádí jako základní údaj nastavení. Při úhlu  $\beta$  v rozmezí mezi 0 až 15° jde o rozdíl maximálně 0,5 stupně mezi hodnotou  $\gamma'$  a  $\gamma$ .

Druhá tryska pak vytváří stopu o stejné velikosti posunutou o rozteč trysek  $E$  ve směru osy  $x$ . Pro účely výzkumu byla zavedeno i přesazení trysek ve směru osy  $y$ . Toto přesazení je označeno jako  $S$ . Tato veličina má za cíl zvětšit šířku oblasti tzv. washoutu. V provozních podmínkách je rovna 0. Přesazení  $S$  zároveň umožňuje na jednom typu trysek modelovat konfigurace s větší roztečí a vzdáleností od povrchu. Levý a pravý okraj druhé trysky označíme  $D_1$  a  $D_2$ , přičemž:

$$D_1 = C_1 + \begin{bmatrix} E \\ S \\ 0 \end{bmatrix}; \quad D_2 = C_2 + \begin{bmatrix} E \\ S \\ 0 \end{bmatrix}$$

Šířka oblasti (pásu) překryvu  $O$ , který pokryjí obě trysky pak je rovna rozdílu  $x$ -ových pozic bodů  $C_2$  a  $D_1$ , tedy:



$$O = \frac{-E (\cos (\beta) - 1) (\cos (\beta) + 1) (-1 + \cos (\alpha)) (\cos (\gamma))^2}{((-1 + \cos (\alpha)) (\cos (\beta))^2 - \cos (\alpha) + 1) (\cos (\gamma))^2 + 2 (\cos (\beta))^2 + \cos (\alpha) - 1} +$$

$$+ \frac{2 H \cos (\beta) \sin (\alpha) \cos (\gamma) - 2 E (\cos (\beta))^2 - E (-1 + \cos (\alpha))}{((-1 + \cos (\alpha)) (\cos (\beta))^2 - \cos (\alpha) + 1) (\cos (\gamma))^2 + 2 (\cos (\beta))^2 + \cos (\alpha) - 1}$$

Pro šířku washoutu je třeba provést složitější výpočet. Předpokládejme, že vodní paprsek dopadem na povrch pokračuje ve stejném vektoru  $(x, y)$ , jako před dopadem s tím rozdílem, že  $z$ -tová složka rychlosti bude po dopadu rovna 0. Vodní paprsek pravé části levé trysky tedy bude pokračovat v pohybu po polopřímce určené body  $[0, 0, -H]$  a  $C_2$ . Tím vytvoří průsečík  $F$  ve stopě pravé trysky reprezentované úsečkou  $D_1 D_2$ . Najít průsečík znamená vyřešit soustavu rovnic:

$$C_2 \cdot t = D_1 + (D_2 - D_1) \cdot s,$$

kde  $t$  náleží  $\mathbb{R}^+$  a  $s$  náleží intervalu  $(0,1)$ . Jedná se o soustavu 3 rovnic o dvou neznámých, kde třetí rovnice neposkytuje žádnou informaci (všechny body leží v rovině  $z = -H$ ). Řešením je:

$$t = \frac{\cos (\gamma) \sin (\beta) H + \cos (\beta) \cos (\gamma) S - E \sin (\gamma)}{\cos (\gamma) \sin (\beta) H}$$

$$s = \frac{1/2 \left( -E \cos (\beta) \sin (\beta) (-1 + \cos (\alpha)) (\cos (\gamma))^2 \right)}{\sin (\alpha) \cos (\gamma) \sin (\beta) H}$$

$$+ \frac{((2 \sin (\alpha) H - \sin (\gamma) S (-1 + \cos (\alpha))) \sin (\beta) + \sin (\alpha) S \cos (\beta)) \cos (\gamma)}{\sin (\alpha) \cos (\gamma) \sin (\beta) H}$$

$$- \frac{E (\sin (\gamma) \sin (\alpha) + 2 \cos (\beta) \sin (\beta))}{\sin (\alpha) \cos (\gamma) \sin (\beta) H}$$

Dosazením do rovnice dostaneme pozici bodu  $F$ . Šířka tzv. washoutu  $W$  je pak rozdíl  $x$ -ových pozic bodu  $F$  a  $C_2$ .

$$W = \frac{(-1 + \cos (\alpha)) (-\cos (\beta) \cos (\gamma) S + \sin (\gamma) E)}{\sin (\beta) (\cos (\beta) \sin (\alpha) + \sin (\beta) \sin (\gamma) (-1 + \cos (\alpha)))}$$

V provozních podmínkách ( $S = 0$ ) je pak šířka washoutu  $W_{pp}$  rovna

$$W_{pp} = \frac{(-1 + \cos (\alpha)) \sin (\gamma)}{\sin (\beta) (\cos (\beta) \sin (\alpha) + \sin (\beta) \sin (\gamma) (-1 + \cos (\alpha)))} E.$$

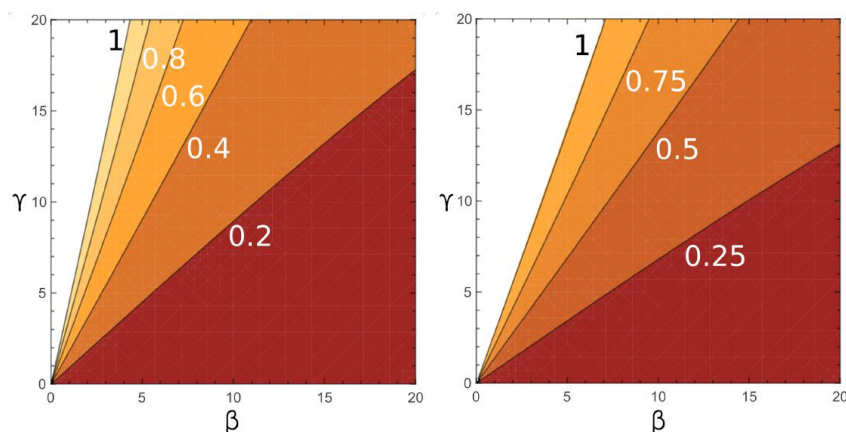
Maximální rozteč trysek  $E_{max}$  je pak omezena šířkou stopy ve směru osy  $x$ :

$$E_{max} = C_2(1) - C_1(1) = \frac{2H \cos(\beta) \sin(\alpha) \cos(\gamma)}{((-1 + \cos(\alpha)) (\cos(\beta))^2 - \cos(\alpha) + 1) (\cos(\gamma))^2 + 2 (\cos(\beta))^2 + \cos(\alpha) - 1}$$

Zavedeme koeficient  $k$ , který bude určovat, jaké procento stopy trysky bude spadat mimo překryv  $O$  (tj. hodnota se pohybuje mezi 0,85 až 1). Nastavení rozteče je pak rovno  $E = k \cdot E_{max}$ . Pokud vydělíme  $W_{pp}$  šířkou stopy  $E_{max}$  ve směru osy  $x$ , pak dostaneme výraz, který určuje, jaké procento šířky ostříkovaného povrchu je ve washoutu:

$$\frac{W_{pp}}{E_{max}} = k \frac{(-1 + \cos \alpha) \sin \gamma}{\sin \beta (\cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \sin \gamma (-1 + \cos \alpha))} \quad [\%]$$

Vzhledem k tomu, že výraz obsahuje několik proměnných a úhel  $\alpha$  je konstrukčně určen, uvedeme výsledky pro několik fixních úhlů  $\alpha$ , které jsou v tomto odvětví obvyklé. Obrázek 4.30 prezentuje výsledky pro trysky s úhlem rozstříku  $25^\circ$  a  $40^\circ$ . Proměnná  $k$  je závislá na nastavení rozteče  $E$ . Úhel  $\beta$  uvažujeme v rozmezí 1 až  $20^\circ$ ,  $\gamma$  v rozmezí 0 až  $20^\circ$  (resp.  $15^\circ$ ). Zbývající výsledky pro úhly  $\alpha$   $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$  a  $50^\circ$  lze nalézt v příloze D.



Obr. 4.30: Procento šířky ostříkovaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku  $25^\circ$  (vlevo) a  $40^\circ$  (vpravo)

#### 4.4.2 | Výběr trysky

Na základě předchozího geometrického modelu byla vybrána Tryska 4 jako nejvhodnější kandidát pro navržený systém měření. Tryska má kompromisní úhel  $30^\circ$  a především se jedná o trysku, která vytváří pravidelný a téměř konstantní impaktní tlak po celé šířce stopy (viz kapitola 4.2). Díky tomuto rozložení impaktního tlaku bude velmi dobře regulovatelný postupný gradient tlaku v oblasti washoutu. Další parametry použité trysky shrnuje tabulka 4.14.

Tab. 4.14: Konstrukční parametry Trysky 4

Označení trysky	Výrobce	Úhel rozstřiku $\alpha_{nom}$ uváděný výrobcem [°]	Průtok vody tryskou při 10 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 20 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 40 MPa [l/min]	Průtok vody pro 20 MPa na stupeň [l/min/°]
Tryska 4	A	30	18	25,46	36	0,84

### 4.4.3 | Impaktní tlak trysek

Série experimentů impaktních tlaků byla určena dle předem daného plánu měření, jehož parametry jsou uvedeny v tabulkách 4.15. Měření byly provedeny dle postupu popsaném v kapitole 3.

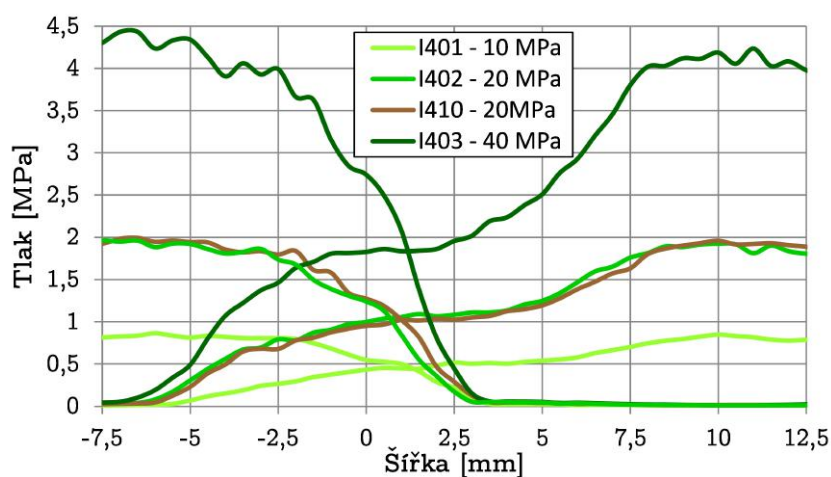
Tab. 4.15: Seznam experimentů I4XX a jejich výsledků

Měření	Rozteč E [mm]	Výška trysky H [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Tlak [MPa]	Přesazení S [mm]	Washout [mm]
I401	43	75	15	15	10	0	10
I402	43	75	15	15	20	0	8,5
I403	43	75	15	15	40	0	8
I404	43	75	15	15	10	-10	19
I405	43	75	15	15	20	-10	19
I406	43	75	15	15	40	-10	19,5
I407	43	75	15	15	10	+10	3
I408	43	75	15	15	20	+10	2,5
I409	43	75	15	15	40	+10	2
I410	43	75	15	15	20	0	8

Plán se odvíjel od tzv. základní konfigurace, která přísluší experimentu I402. Všechny konfigurace trysek mají společnou rozteč, výšku trysky i úhly natočení.

Základní (středová) konfigurace má nulové přesazení, obě trysky jsou tedy umístěny vedle sebe v řadě, a operuje s tlakem 20 MPa. Experiment I401 (resp. I403) mění oproti základní konfiguraci tlak na 10 MPa (resp. 40 MPa). Experimenty I404 až I406 (resp. I407 až I409) měří pro záporné (resp. kladné) přesazení tlaky 10, 20 a 40 MPa. Experiment I410 testuje opakovatelnost měření základní konfigurace I402. Při tomto měření je měřená soustava rozebrána a pečlivě opětovně sestavena.

Pro všechny experimenty byla podrobně scanována pouze oblast překryvu a washoutu. Podrobně jsou výsledky impaktních tlaků prezentovány graficky v příloze D. Pro účely stanovení šířky ovlivněné oblasti je analyzován profil ovlivněné části pravé trysky. Výsledky a porovnání jednotlivých profilů v rámci jednotného přesazení je prezentováno na obrázcích 4.31, 4.32 a 4.33. Šířka washoutu byla stanovena jako

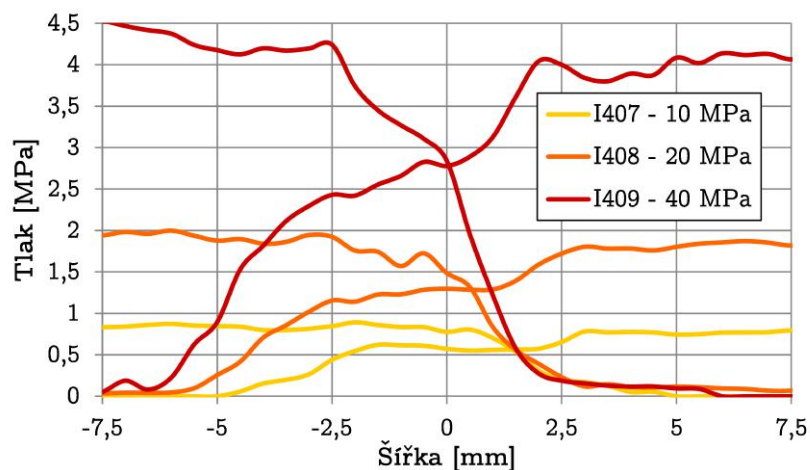


Obr. 4.31: Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek při nulovém přesazení trysek

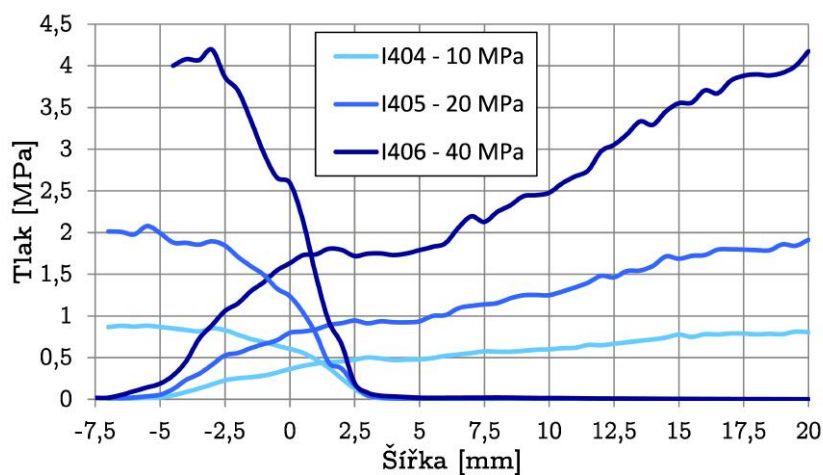
úsek mezi pozicí 0, což je pozice, kdy hodnota profilu levé trysky klesne pod polovinu maximální měřené hodnoty tlaku u této trysky, a pozicí, kdy profil pravé trysky dosáhne alespoň průměrné hodnoty impaktního tlaku levé (neovlivněné) trysky. Vypočítané šířky washoutu jsou zapsány v tabulce 4.15. Na obrázku 4.31 lze vidět výsledky opakovatelnosti měření mezi experimenty I402 a I410. Lze konstatovat, že dochází k velice dobré opakovatelnosti měření.

Vliv tlaku na šířku libovolného měřeného úseku nebyl statisticky prokázán. P hodnota pro tento parametr se v modelech zahrnujících kvadratickou i lineární složku pohybovala v rozmezí 0,15 až 0,8. Pokud bychom i přesto tuto závislost chtěli modelovat, byl by vliv tlaku na výslednou šířku úseků v řádech jednotek procent. Lze tedy předpokládat, že tlak nehraje statisticky významnou roli a dále se budeme zabývat pouze vlivem přesazení trysek.

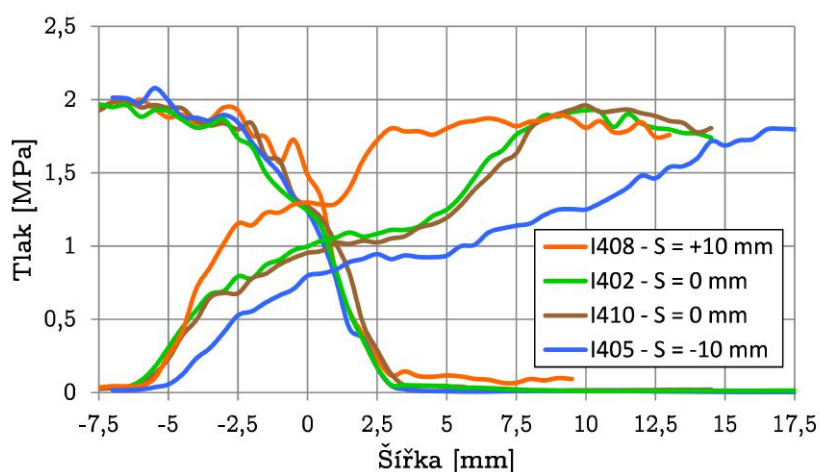
Při konfiguracích bez přesazení se šířka washoutu pohybovala mezi 8 až 10 mm. Přesazení o  $-10$  mm způsobilo zkrácení šířky na 2 až 3 mm, zvětšení přesazení na 10 mm naopak rozšířilo washout až na 19 až 19,5 mm. Tato změna širě je zobrazena



Obr. 4.32: Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek při kladném přesazení trysek o 10 mm



Obr. 4.33: Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek při záporném přesazení trysek o 10 mm

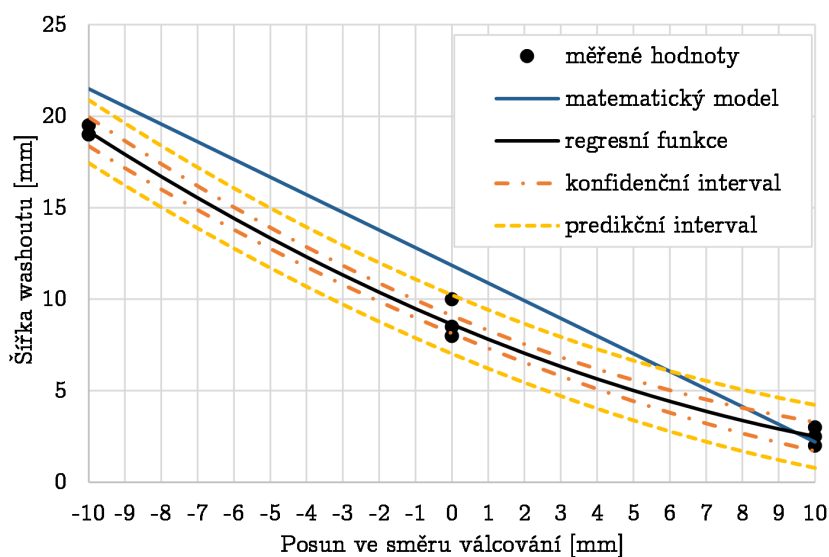


Obr. 4.34: Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek pro experimenty měřené při jednotném pracovním tlaku 20 MPa

v obrázku 4.34 pro experimenty realizované při pracovním tlaku 20 MPa. Regresní model potvrdil, že přesazení má vliv na šířku washoutu a to jak lineárně, tak kvadraticky. Lineární i kvadratický člen regresní rovnice byly shledány jako statisticky významné. Regresní rovnici lze vyjádřit následovně

$$W_{exp} = 0,02208 \cdot S^2 - 0,8333 \cdot S + 8,625; \quad [\text{mm}]$$

kde  $S$  označuje přesazení trysky v milimetrech. Koeficient determinace byl 0,99. Výsledná regresní funkce je na obrázku 4.35. Regresní funkce je zobrazena černě. Oranžové meze určují oblast konfidenčního intervalu, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet i skutečný výsledek regresní funkce. Žlutě je označen predikční interval, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet libovolné další měření, které bude provedeno za stejných podmínek, jako měření určující danou regresní funkci. Modře je označen odhad geometrického modelu prezentovaného v úvodu kapitoly. Geometrický model tedy poměrně dobře stanovuje horní odhad na šířku oblasti washoutu.



Obr. 4.35: Regresní funkce washoutu v závislosti na přesazení a odhad geometrického modelu

#### 4.4.4 | Měření kvality odkujení

Měření kvality odkujení měly za cíl prokázat, že může dojít ke kvalitativnímu rozdílu mezi oblastí washoutu, překryvu a povrhu, který je standardně ostříkavý pouze jednou tryskou. Experimenty byly provedeny v souladu s postupem popsáním v kapitole 3. Byla vybrána konfigurace trysek, která odpovídala měřením I404–I406 v tabulce 4.15, kdy došlo k přesazení trysek takovým způsobem, že šířka washoutu

byla nejširší. Přestože bylo realizováno mnoho experimentů při různých pracovních tlacích, rychlostech posuvu i časech oxidace, je v seznamu měření 4.16 uveden pouze ilustrativní zlomek těchto měření.

Tab. 4.16: Seznam experimentů Q4XX

Měření	Tlak [MPa]	Přesazení [mm]	Rozteč [mm]	Výška trysky [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Rychlost vzorku [m/s]	Material	Čas oxidace [min]	Předehřev [°C]	Teplota oxidace [°C]
Q405	20	-10	43	75	15	15	2	54SiCr6	25	1 300	1 240
Q405a	20	-10	43	75	15	15	2	54SiCr6	120	1 300	1 240
Q405b	30	-10	43	75	15	15	2	S235JR	25	1 300	1 240
Q406	40	-10	43	75	15	15	2	HDT580X	120	1 240	1 200

Pro první testy byla zvolena křemíková pružinová ocel 54SiCr6 (1.7102), která byla podrobně analyzována v prvním cíli dizertační práce. Bohužel již po několika experimentech při teplotě oxidace 1200 °C se ukázalo, že tato ocel není pro průkaznost vznesených hypotéz vhodná, neboť vždy došlo k odstranění celé vyšší vrstvy okují, které se odlupovaly ve velkých plátech, a spodní vrstva okují zůstala zachována v celé šířce. Tento výsledek se opakoval i v případech různých rychlostí posuvu, různých časů ohřevu a různých pracovních tlaků trysky. Tyto výsledky ilustruje zde uvedené měření Q405 a obrázek 4.36. U tohoto experimentu byla v oblasti ostříku průměrná výška okují 7 µm, mimo ostřík 37 µm. Při delších časech oxidace navíc vznikaly na povrchu oceli nerovnoměrné plyskýře, díky kterým nebylo možné relevantně vyhodnotit prezentovanou konfiguraci. Toto chování ilustruje výsledek experimentu Q405a a obrázek 4.37. U tohoto experimentu se pohybovala v oblasti ostříku průměrná výška okují mezi 16 až 31 µm, mimo ostřík 370 µm.



Obr. 4.36: Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající experimentu I405 na oceli 54SiCr6 při době oxidace 25 minut





Obr. 4.37: Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající experimentu I405 na oceli 54SiCr6 při době oxidace 120 minut

Pro další testy byla proto zvolena nelegovaná jakostní konstrukční ocel S235JR (1.0038). Výsledek byl opět podobný jako v případě předešlého materiálu, nedocházelo k rozdílu mezi jednotlivými oblastmi a výsledky byly velmi neprůkazné. K odstranění vrstvy okují docházelo ve velkých oblastech a to i s velkým přesahem mimo odkujované oblasti. Toto chování ilustruje experiment Q405b a obrázek 4.38. U tohoto experimentu se pohybovala v oblasti ostříku průměrná výška okují mezi 10 až 25  $\mu\text{m}$ .



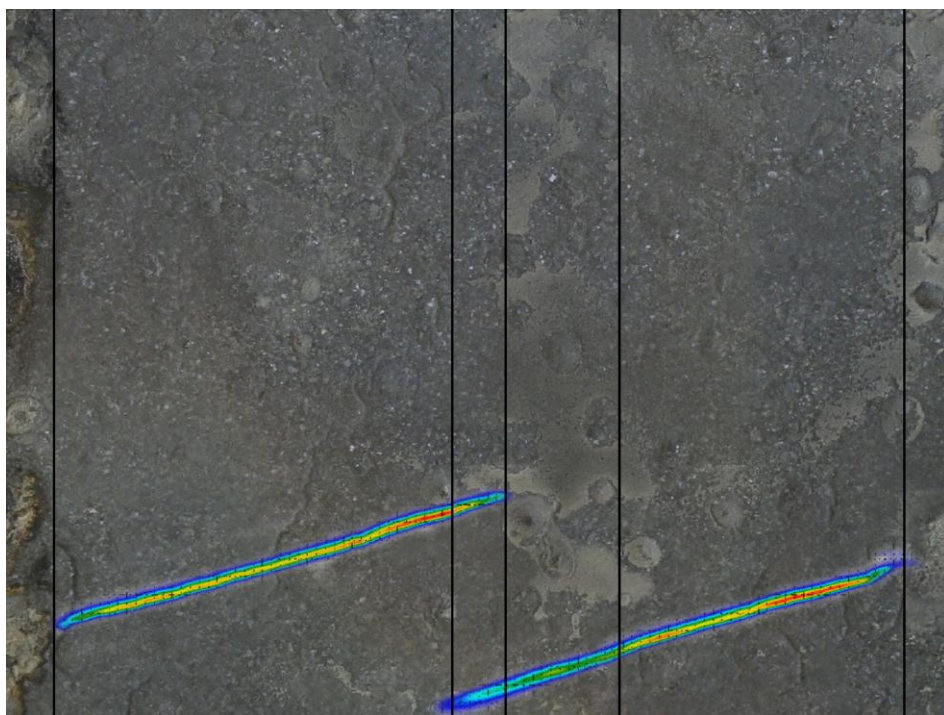
Obr. 4.38: Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající experimentu I405 (s pracovním tlakem 30 MPa) na oceli S235JR při době oxidace 25 minut

Dobré výsledky byly zaznamenány až při experimentech s ocelí HDT580X (1.0936), kdy docházelo k rozbíjení vrchní vrstvy okují na menší kusy. Díky tomuto rozdrobení bylo možné vyhodnotit vliv v jednotlivých částech ostříkávaného povrchu. V oblasti washoutu zde docházelo k redukci tlaku a větší část z okují, které vznikaly na povrchu, zde nebyla odstraněna. Nejvýraznějšího efektu bylo docíleno v experimentu Q406. Obrázek 4.39 ukazuje výsledek experimentu s naznačenými stopami impaktního tlaku v dolní části obrázku. Změna povrchu byla pozorovatelná pouhým okem. Deska byla následně rozříznuta a výsledný rozdíl tloušťky zbývajících okují byl analyzován na mikroskopu (viz 4.40).

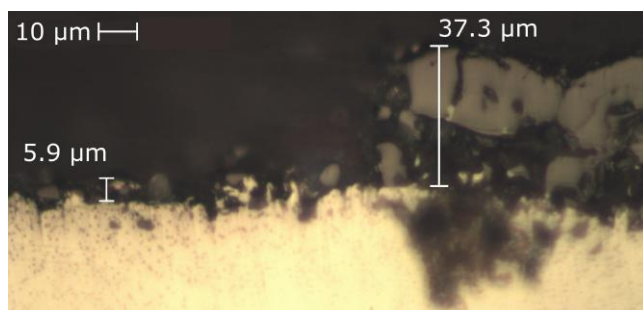
Mikroskop potvrdil, že mezi oblastí washoutu a povrchem standardně ostříkavým pouze jednou tryskou může dojít k rozdílné kvalitě odstraňování okují. V oblasti washoutu se tloušťka vrstvy okují pohybovala mezi 0 až 74  $\mu\text{m}$ , průměrná hodnota tloušťky vrstvy byla 43  $\mu\text{m}$ . V oblasti, kde tlak trysky nebyl negativně ovlivněn,



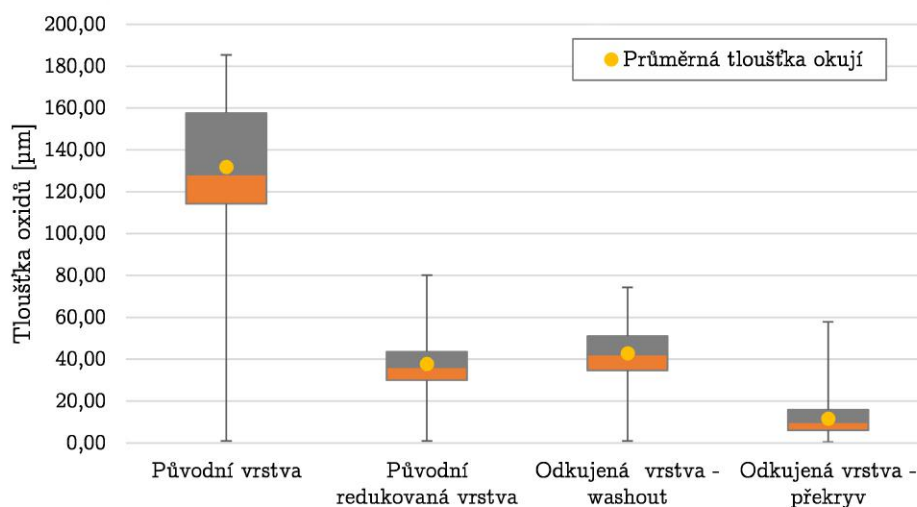
se tloušťka vrstvy pohybovala mezi 0 až 58  $\mu\text{m}$ , průměrná hodnota tloušťky vrstvy byla 12  $\mu\text{m}$ . Výsledky byly porovnány se změřenou tloušťkou oxidů v kapitole 4.1. Tyto výsledky shrnuje krabicový graf na obrázku 4.41. Nebyl shledán statisticky významný rozdíl mezi oblastí, kde byla původní vrstva redukována prostým odloupením, a oblastí washoutu trysek.



Obr. 4.39: Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající experimentu I406 na oceli HDT580X při době oxidace 120 minut



Obr. 4.40: Snímek z mikroskopu na rozhraní mezi lépe a hůře odkujenou částí oceli HDT580X při experimentu Q406



Obr. 4.41: Krabicový graf tloušťky vrstvy okují oceli HDT580X po 120 minutách oxidace při teplotě 1200°C při experimentu Q406

#### 4.4.5 | Závěr výzkumného cíle

Prezentované experimenty prokázaly, že velikost přesazení trysek má vliv na šířku oblasti, kde je impaktní tlak pravé trysky konfigurace redukován. Tuto šířku lze poměrně spolehlivě odhadnout pomocí geometrického modelu pro obecnou konfiguraci či pro prezentovanou konfiguraci pomocí modelu regresního. Experimenty naopak neprokázaly, že by měl tlak statisticky významný vliv na šířku této oblasti.

Měření kvality odkujení ukázaly, že mohou existovat typy ocelí, na kterých se tato nerovnoměrnost tlaku může projevit v podobě hůře odkujených pásů okují na povrchu. Přestože tato situace nastává jen za specifických podmínek, je třeba, aby tomuto problému bylo aktivně zabráněno tím, že bude šířka této oblasti minimalizována. Možností minimalizace šířky washoutu je celá řada. Geometrický model ukázal, že největší vliv mají především vysoké hodnoty úhlu  $\gamma$ , který je v provozních podmínkách mnohdy nastaven až na 15°.

## 4.5 | Nalezení optimálních úhlů natočení a roztečí trysek pro potlačení nehomogenity odkujení v oblasti překryvu

Pátý cíl dizertační práce navazuje na cíl předchozí, tentokrát se ale zaměřuje přímo na pás překryvu vodních paprsků, tedy místo, které je ostříkáváno oběma vodními paprsky současně. Tento pás je velmi úzký, ale může zde docházet k největší nehomogenitě při odkujování. Skladba experimentů i v této části vychází z geometrického modelu, který byl představen v kapitole 4.4. Tento geometrický model opět ukazuje, že pro zlepšení homogenity odkujovaného povrchu bude optimální mít úhel  $\gamma$  co nejmenší. Základní konfigurace tohoto cíle tedy pokládá úhel  $\gamma$  roven nule a zkoumá vliv malých variací tohoto úhlu.

### 4.5.1 | Výběr trysky

Pro tento cíl byla vybrána Tryska 5. Tryska 5 v prvotních experimentech vykazovala velmi dobrý a téměř konstantní profil. Parametry trysky shrnuje tabulka 4.17.

Tab. 4.17: Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody

Označení trysky	Výrobce	Úhel rozstříku $\alpha_{nom}$ uváděný výrobcem [°]	Průtok vody tryskou při 10 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 20 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 40 MPa [l/min]	Průtok vody pro 20 MPa na stupeň [l/min/°]
Tryska 5	C	45	29	41	58	0,91
Tryska 5a	C	45	29	41	58	0,91

Tato tryska byla pro následující výzkum vybrána i z toho důvodu, že byly k dispozici dva páry trysek identického typu. Jeden pár byl nový, druhý pár již byl použitý v provozu po dobu několika měsíců (v tabulce 4.17 označen jako 5a). Stabilizátor této trysky byl uvnitř viditelně opotřeбенý a vyskytovaly se v něm kusy malých cizích těles, které nebyly odstranitelné. Samotné ústí opotřeбенé trysky bylo vizuálně v pořádku. Tento cíl tedy částečně porovnával i efektivitu trysek po delší době provozu.

### 4.5.2 | Impaktní tlak trysek

S Tryskou 5 bylo realizováno široké spektrum experimentů. Tyto experimenty jsou přehledně shrnuty v tabulce 4.18. Všechny experimenty mají nastavenou jednotnou výšku trysky 55 mm a jednotný úhel náklonu 15°.

Tab. 4.18: Seznam experimentů I5XX a jejich výsledků

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Rozteč trysek [mm]	Výška trysek [mm]	Úhel natočení trysky [°]	Úhel náklonu trysky [°]	Změřená šířka stopy trysky [mm]	Vypočítaná šířka připadající na překryv [mm]
I501	5	40	43	55	0	15	-	5,4
I501L	5	40	43	55	0	15	48,6	-
I501R	5	40	43	55	0	15	48,2	-
I501a	5a	40	43	55	0	15	-	5,1
I501aL	5a	40	43	55	0	15	47,9	-
I501aR	5a	40	43	55	0	15	48,3	-
I502	5	40	46	55	0	15	-	2,4
I503	5	40	49	55	0	15	-	-0,6
I504	5	10,5	46	55	0,4	15	-	2,4
I505	5	10,5	43	55	0,4	15	-	5,4
I506	5	40	43	55	0,4	15	-	5,4
I507	5	40	43	55	1,25	15	-	5,4
I508	5	40	43	55	2,5	15	-	5,5
I509	5	40	43	55	15	15	-	3,6

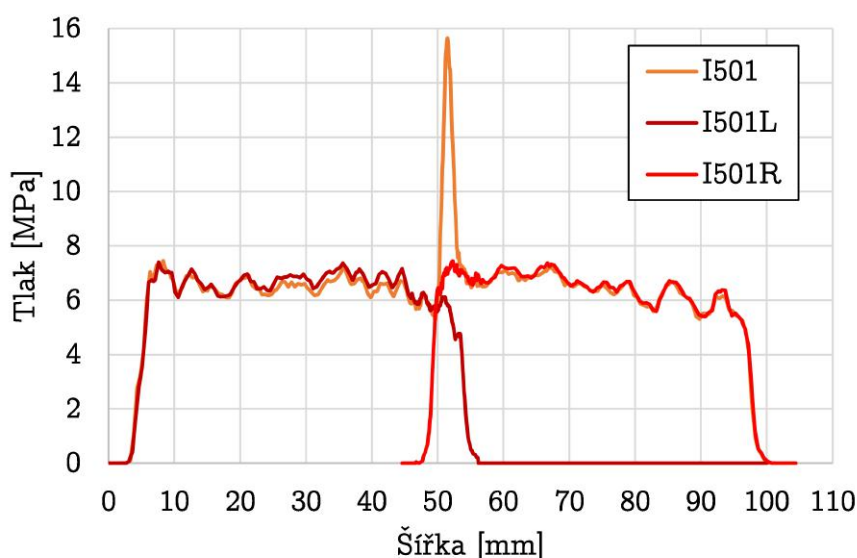
Za základní konfiguraci je určen experiment I501, kdy je úhel natočení 0° a vodní paprsky přímo kolidují těsně nad ostříkávaným povrchem. Tlak konfigurace je nastaven na 40 MPa. Základní rozteč je nastavena na 43 mm, což vytvoří předpokládanou šířku překryvu zhruba 5,4 mm. Experimenty I501L a I501R měří samostatně impaktní tlak levé a pravé trysky pracující samostatně. Experiment I501a měří identickou konfiguraci jako experiment I501 ovšem s opotřebovaným párem Trysek 5a. Podobně experimenty I501aL a I501aR měří pravou a levou trysku opotřebovaného páru samostatně.

Experimenty I502 a I503 vycházejí z experimentu I501 a zkoumají vliv změny rozteče na 46 mm a 49 mm na rozložení impaktního tlaku. V těchto případech bude teoreticky vypočítaný překryv stop trysek 2,4 mm a  $-0,6$  mm. Záporná hodnota vypočteného překryvu ukazuje situaci, kdy je rozteč nastavena na předpokládanou maximální hodnotu. Experimenty I504 a I505 studují vliv změny rozteče z 43 mm na 46 mm při tlaku 10,5 MPa.

Experimenty I506, I507 a I508 vychází opět z experimentu I501 a zkoumají vliv variace úhlu natočení na rozložení impaktního tlaku. Všechny experimenty pak pokrývaly úhly  $0^\circ$ ;  $0,4^\circ$ ;  $1,25^\circ$  a  $2,5^\circ$ .

Na závěr je zde uvedeno pro porovnání i měření I509, které vychází z měření I501 a liší se od něj pouze úhlem natočení, který je  $15^\circ$  a běžně se používá v průmyslu.

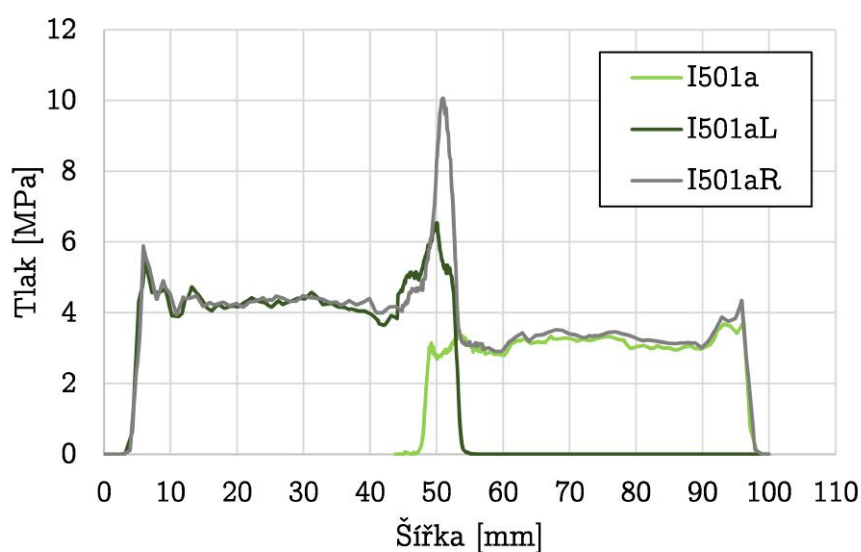
Výsledky profilu impaktního tlaku základní konfigurace I501 na obrázku 4.42 ukazují, že v místě střetu paprsků dochází k více než dvojnásobnému nárůstu impaktního tlaku na velmi malé ploše. Prostý algebraický součet tlaků obou trysek je



Obr. 4.42: Profil impaktního tlaku experimentů I501, I501L a I501R s úhlem natočení  $0^\circ$

v této oblasti dosahuje 13,4 MPa, změřené reálné maximum dosahuje až 15,5 MPa. Šířka pásu, kde k nárůstu dochází, je menší, než předpokládaný překryv. Průměrný maximální impaktní tlak obou trysek byl 6,5 MPa. Výsledky tohoto pozorování byly prezentovány již v roce 2015 v konferenčním příspěvku [A1] a v článku [A6] pro měření s větší velikostí plochy snímacího senzoru. Aktuálně prezentované výsledky na obrázku 4.42 již zpřesňují tato měření s použitím menšího senzoru.

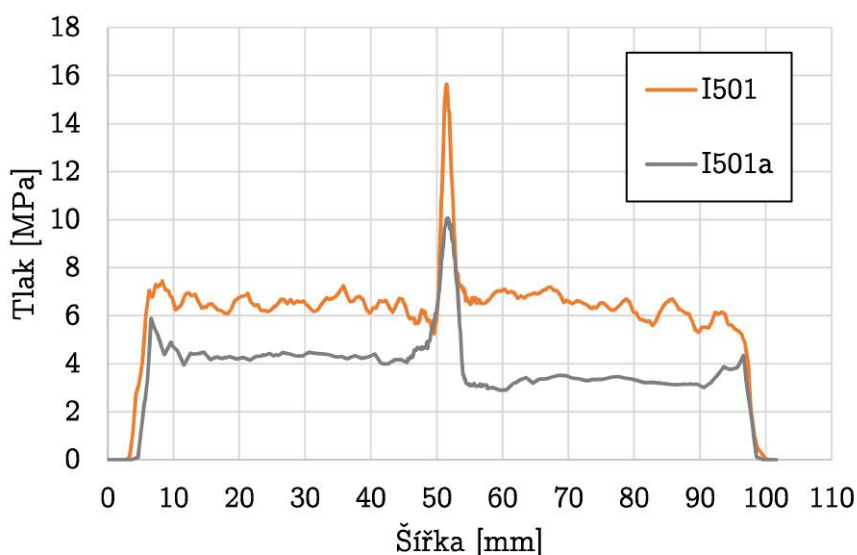
V případě záměny trysek za trysky opotřebené došlo k významnému poklesu impaktního tlaku (viz obr. 4.43). Trysky samostatně měly průměrnou maximální hodnotu impaktního tlaku pouze 3,1 MPa a 4,4 MPa a vykazovaly nehomogenní



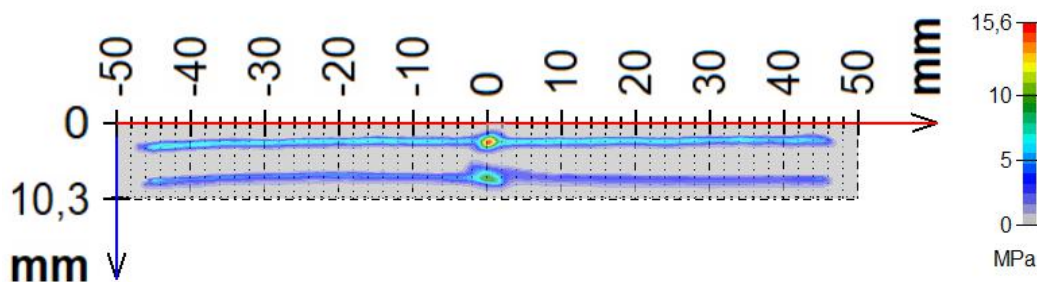
Obr. 4.43: Profil impaktního tlaku experimentů I501a, I501aL a I501aR s opotřebeným párem Trysek 5a a úhlem natočení  $0^\circ$

impaktní tlak především na okraji stopy. V oblasti překryvu došlo opět k nárůstu tlaku, který byl větší než prostý algebraický součet impaktních tlaků obou trysek.

Při společném porovnání s experimentem I501 na obrázku 4.45 a 4.44 je vidět, že za dobu pracovního procesu trysky dochází ke snížení maximálního impaktního tlaku vlivem částic, které mohou vniknout do systému, a je třeba s tímto faktem počítat i při návrhu konfigurace trysky v oblasti překryvu (a i mimo něj).

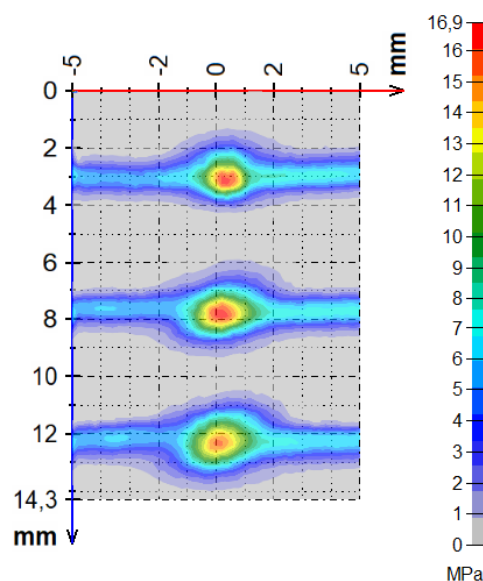


Obr. 4.44: Porovnání profilu impaktního tlaku u nového a opotřebeného páru

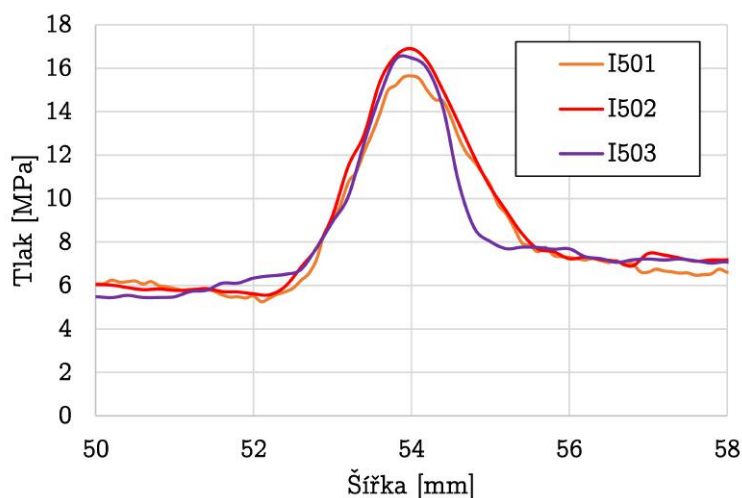


Obr. 4.45: Porovnání impaktního tlaku u nového a opotřebovaného páru

Dále lze porovnat vliv změny rozteče trysek na rozložení impaktního tlaku v překryvu. Trojice experimentů I501, I502 a I503 se liší pouze roztečí. Výsledek rozložení impaktního měření v oblasti překryvu je vidět pro všechna měření na obrázku 4.46. Mezi experimenty lze pozorovat jen minimální rozdíly, přestože by vypočtená oblast překryvu měla být 5,4 mm (resp. 2,4 mm a  $-0,6$  mm). Také profil jednotlivých experimentů na obrázku 4.48 se zdá býti téměř identický. Podobný výsledek byl zaznamenán i pro pracovní tlak 10,5 MPa s experimenty I504 a I505. Porovnání těchto výsledků je na obrázku 4.48.

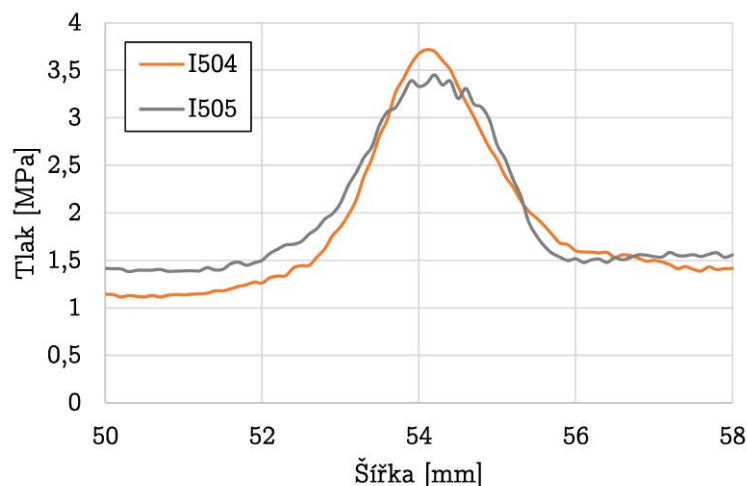


Obr. 4.46: Vliv rozteče 43 mm (nahore), 46 mm (uprostřed) a 49 mm (dole) na rozložení impaktního tlaku



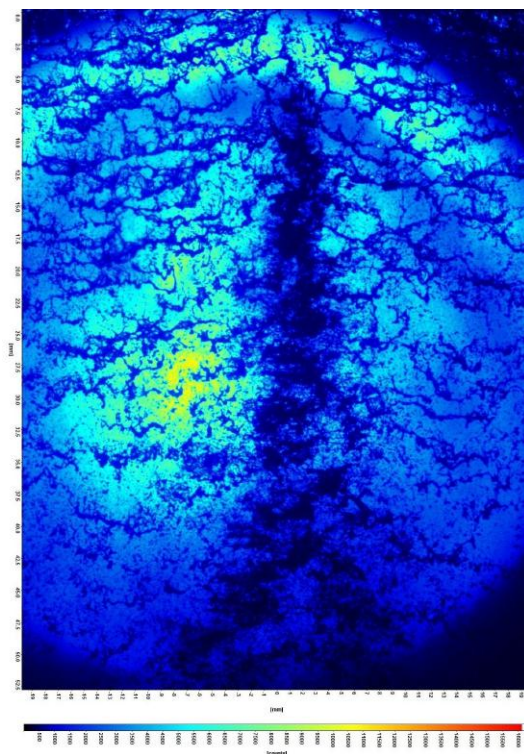
Obr. 4.47: Vliv rozteče na rozložení profilu impaktního tlaku pro tlak 40 MPa





Obr. 4.48: Vliv rozteče na rozložení profilu impaktního tlaku pro tlak 10,5 MPa

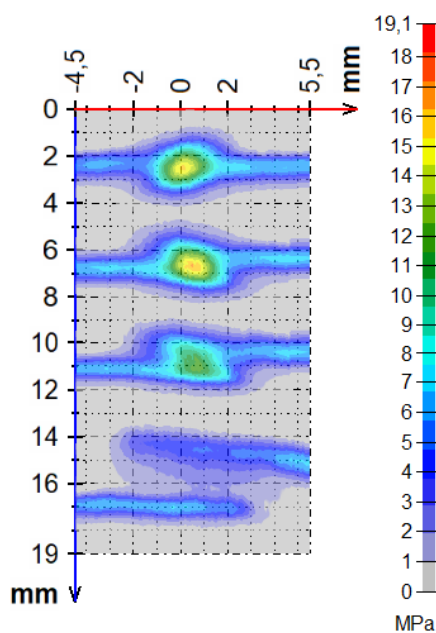
Toto pozorování lze vysvětlit povahou srážky paprsků v překryvu. Tato srážka je dynamická a výsledek tedy nemůže být pouhým algebraickým součtem tlaků, dochází zde naopak k deformaci vodního paprsku již nad povrchem. Pro tuto oblast byla v rámci spolupráce s Ústavem geoniky pořízena stínografická fotografie s Tryskou 4. Na fotografii 4.49 je vidět zúžení oblasti překryvu oproti předpokládanému výsledku. Dochází rovněž ke změně struktury paprsku.



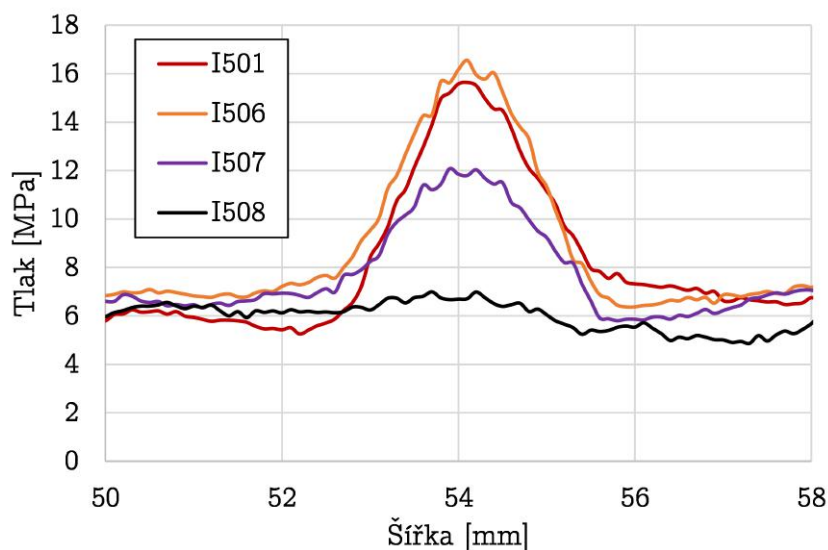
Obr. 4.49: Stínografická fotografie srážky plochých vodních paprsků Trysky 4



Pokud u základní konfigurace I501 naopak budeme měnit úhel natočení, bude docházet k postupné redukci tohoto maxima. Obrázek 4.50 ukazuje rozložení impaktních tlaků u experimentů I501, I506, I507 a I508. Obrázek 4.51 tuto informaci doplňuje ještě o jednotlivé profily těchto experimentů. Při zvyšujícím se úhlu natočení dochází k postupnému míjení paprsků. Při úhlu natočení  $2,5^\circ$  se pak paprsky zcela minou a je názorně vidět teoreticky vypočtená šířka oblasti překryvu trysek. V tomto případě se i impaktní profil konfigurace stane v této oblasti téměř konstantním.



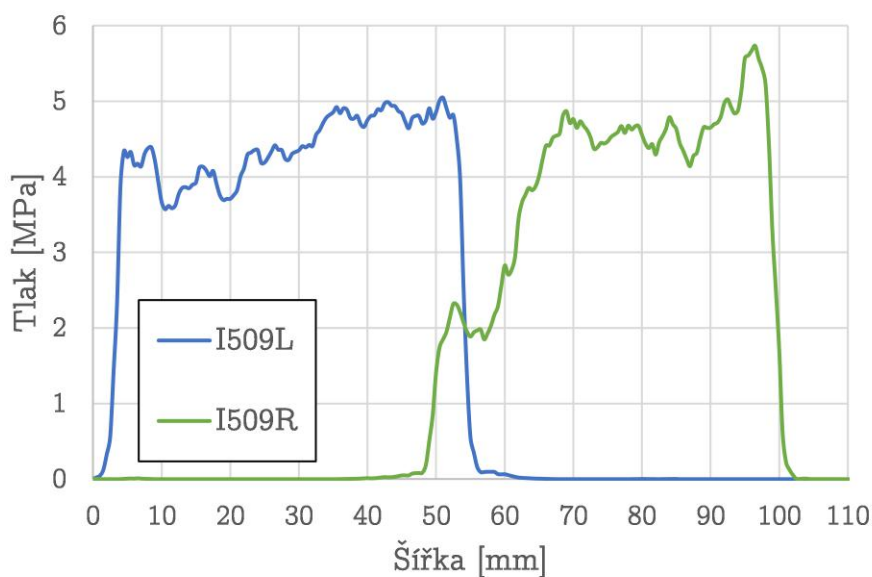
Obr. 4.50: Vliv úhlu natočení na rozložení impaktního tlaku. Odshora  $0^\circ$ ;  $0,4^\circ$ ;  $1,25^\circ$  a  $2,5^\circ$



Obr. 4.51: Vliv úhlu natočení na rozložení profilu impaktního tlaku

Experiment I509 je v porovnání s ostatními experimenty umístěn samostatně, neboť je měřen ještě na původním zařízení pro měření impaktních tlaků, kde byl průměr měřícího senzoru 1 mm a tím je i měření samotné vůči ostatním zkresleno. Výsledek experimentu nicméně doplňuje sérii měření o úhel natočení  $15^\circ$  a nastiňuje skutečný tvar profilu impaktního tlaku v průmyslu.

Vybrané výsledky jsou podrobněji prezentovány v příloze E.



Obr. 4.52: Profil impaktního tlaku experimentu I509 (pravá a levá stopa trysek označena R, resp. L) s úhlem natočení 15°

### 4.5.3 | Eroze vodního paprsku

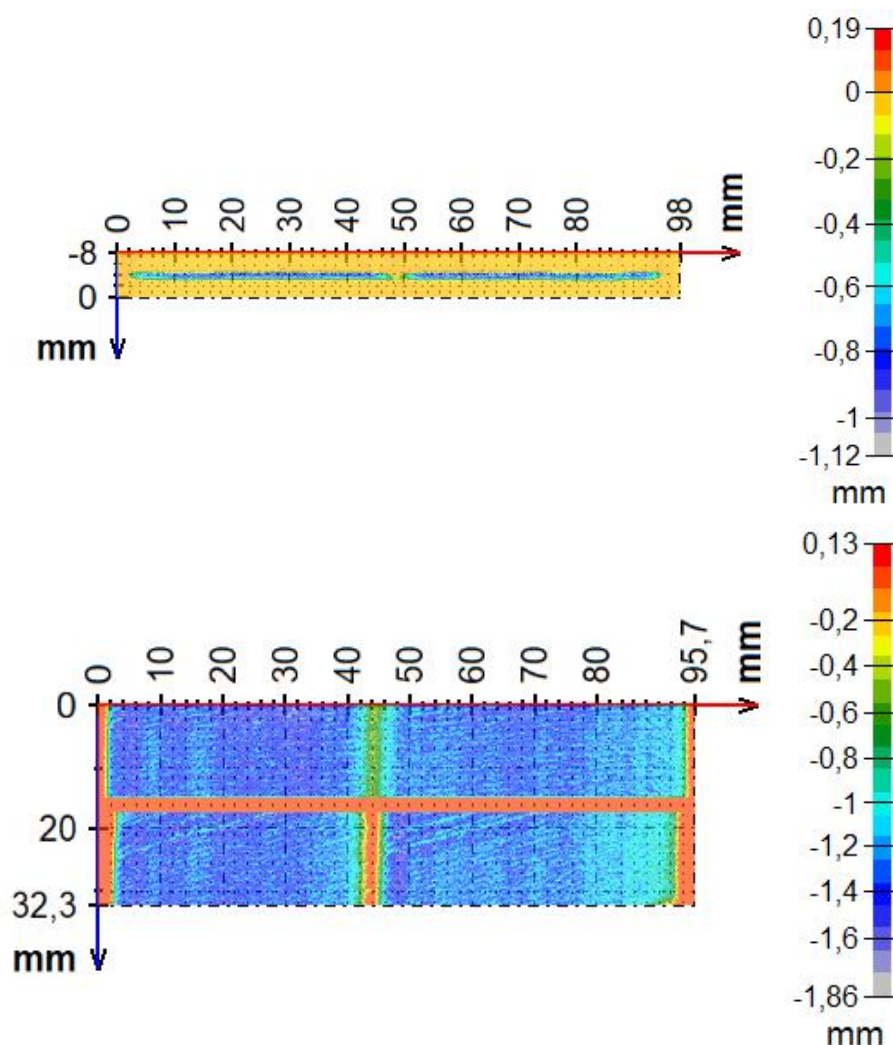
Byly realizovány tři experimenty zkoumající erozi (viz tabulka 4.19). Experiment E501, který navazuje na měření I501, a experiment E509, který navazuje na měření I509. Experiment E510 zkoumá erozivní účinek pro konfiguraci s úhlem natočení 5°. Výsledky erozivního účinku pro úhel natočení 0° jsou již prezentovány v publikacích [A1] a [A6].

Tab. 4.19: Seznam experimentů E5XX

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Rozteč trysek [mm]	Výška trysek [mm]	Úhel natočení trysky [°]	Úhel náklonu trysky [°]
E501	5	40	43	55	0	15
E509	5	40	43	55	15	15
E510	5	40	43	56	5	15

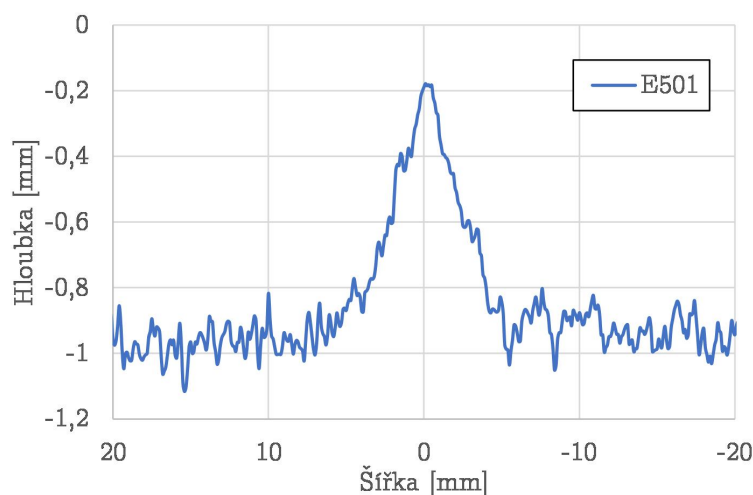
Měření bylo realizováno dle postupu popsáném v kapitole 3. Při experimentech E509 a E510 docházelo k pomalému posuvu ostříkávaného materiálu pod tryskou,

došlo tedy k souvislému odstraňování hliníku z povrchu. Experiment E501 byl realizován bez posuvu. Profil celé desky byl analyzován 3D scannerem a byl vytvořen počítačový model. Z tohoto modelu byla následně vyňata prostřední část a její profil byl analyzován. U experimentů E509 a E510 byl profil eroze stanoven jako průměr 20 po sobě následujících řezů střední části modelu. Analyzované části povrchu jsou zobrazeny na obrázku 4.53. Jednotlivé profily hloubky odebraného materiálu jsou zobrazeny na obrázcích 4.54 a 4.55.

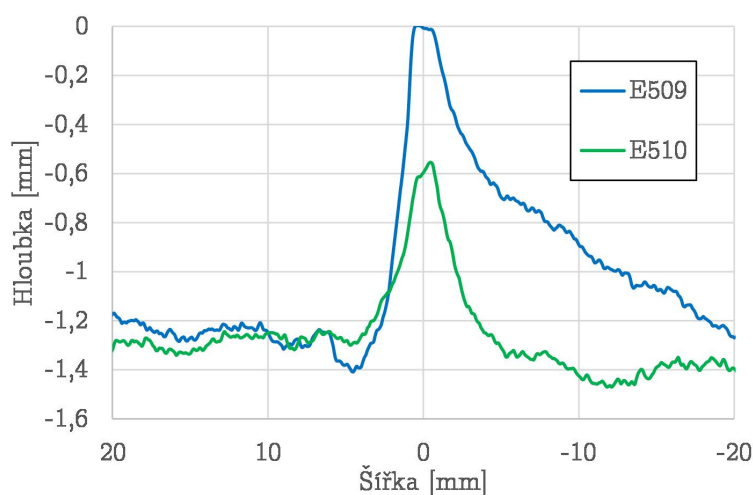


Obr. 4.53: Výsledky experimentů E501 (nahore), E510 (uprostřed) a E509 (dole)

Erozivní profil experimentu E501 ukazuje, že v oblasti překryvu dochází k minimu erozivního účinku paprsku, přestože zde dochází k maximálnímu impaktnímu tlaku. Experiment E510 vykazuje velmi podobný profil. V oblasti překryvu je ovšem erozivní účinnost relativně lepší než v případě experimentu E501. Tyto experimenty však nelze vzájemně porovnávat z hlediska absolutních hodnot, neboť povrch hliníku byl ostříkáván po různou dobu a tím i průměrné hloubky těchto experimentů jsou různé.



Obr. 4.54: Profil eroze v oblasti překryvu u experimentu E501



Obr. 4.55: Profil eroze v oblasti překryvu u experimentů E509 a E510

Výsledek experimentu E509 v oblasti překryvu také dosáhl minima a část profilu odpovídá původnímu povrchu desky, nebyl zde tedy odstraněn žádný materiál. Vlivem natočení trysek dochází i k redukci impaktního tlaku v oblasti washoutu a proto je i zde eroze redukována a to až v šířce 20 mm. Šířka pásu, kde k erozi povrchu nedocházelo vůbec byla zhruba 1,3 mm.

#### 4.5.4 | Měření homogenity chlazení

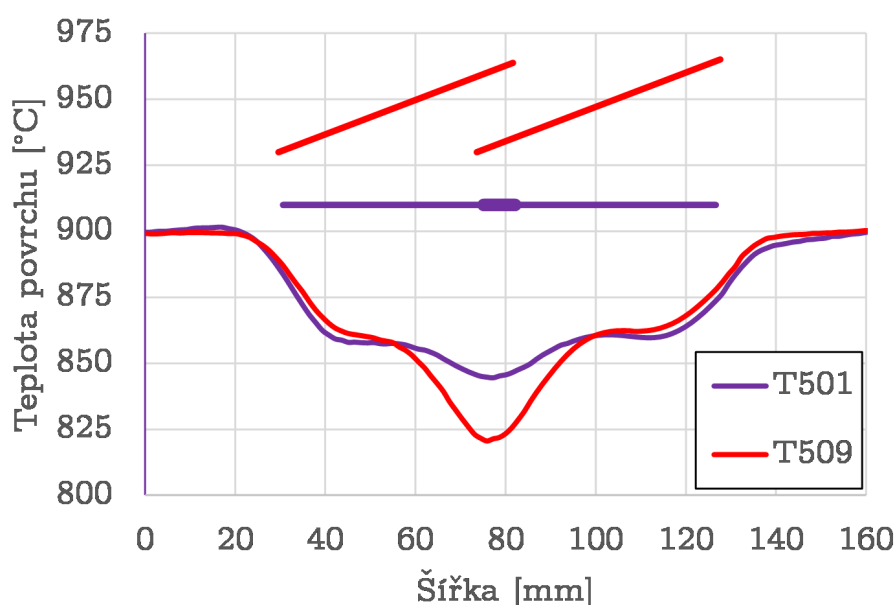
Byly realizovány dva experimenty zkoumající teplotu povrchu a homogenitu chlazení trysek (viz tabulka 4.20). Měření bylo realizováno dle postupu popsáném v kapitole 3. Experimenty T501 a T509 vzájemně zkoumají rozdíl v chlazení povrchu při různém natočení trysek. Tyto výsledky byly již prezentovány v konferenčním příspěvku [A2].

Tab. 4.20: Seznam experimentů T5XX

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Rozteč trysek [mm]	Výška trysek [mm]	Úhel natočení trysky [°]	Úhel náklonu trysky [°]	Teplota [°C]
T501	5	40	43	55	0	15	900
T509	5	40	43	55	15	15	900

Vzájemné porovnání výsledků experimentů je na obrázku 4.56. Teplotní křivka ukazuje teplotní profil povrchu oceli 0,7 s po kontaktu vodního paprsku s povrchem. V horní části grafu jsou načrtnuty příslušné impaktní stopy trysek.

Při experimentu T501 byl zaznamenán mírný pokles teploty v oblasti překryvu, která byla pravděpodobně způsobena zvýšeným impaktním tlakem. Pozorovaný pokles teploty byl cca 15 °C. V případě experimentu E509 byl pokles teploty výrazně vyšší a dosáhl až 40 °C. Z porovnání těchto výsledků vyplývá, že natočení trysek má výrazný vliv na homogenitu chlazení povrchu. Minimalizací úhlu natočení dojde i ke zlepšení homogenity chlazení od odkujovacích trysek.



Obr. 4.56: Porovnání homogenity chlazení u experimentů T501 a T509; v horní části grafu jsou naznačeny stopy příslušných konfigurací

### 4.5.5 | Součinitel přestupu tepla

Byly realizovány čtyři experimenty zkoumající součinitel přestupu tepla jednotlivých konfigurací (viz tabulka 4.21). Měření bylo realizováno dle postupu popsaném v kapitole 3. Opět byla testována základní konfigurace trysek v experimentu H501. Dále byla doplněna o experiment H503, který zkoumal vliv zvětšení rozteče trysek na součinitel přestupu tepla v oblasti překryvu. Experiment H506 naopak u původní základní konfigurace upravil úhel natočení na  $2,5^\circ$ . Poslední experiment H509 zkoumal konfiguraci s úhlem natočení  $15^\circ$ . Všem experimentům byla nastavená společná rychlost posuvu  $0,5 \text{ m/s}$ .

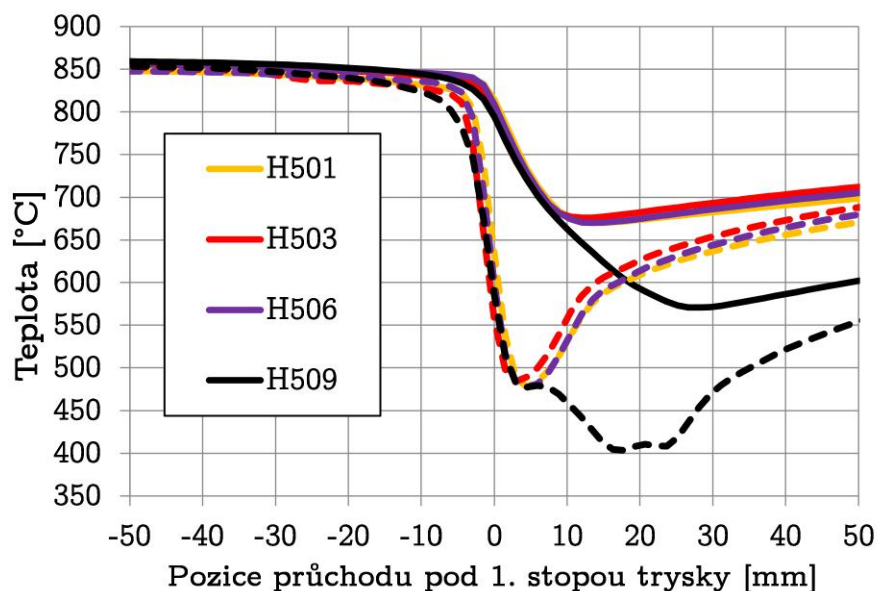
Tab. 4.21: Seznam experimentů H5XX a jejich výsledků

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Rozteč trysek [mm]	Výška trysek [mm]	Úhel natočení trysky [ $^\circ$ ]	Úhel náklonu trysky [ $^\circ$ ]	Rychlost vzorku [m/s]	Teplota [ $^\circ\text{C}$ ]	Průměrný součinitel přestupu tepla [ $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ]
H501	5	40	43	55	0	15	0,5	900	7 704
H503	5	40	49	55	0	15	0,5	900	7 391
H506	5	40	43	55	2,5	15	0,5	900	7 570
H509	5	40	43	55	15	15	0,5	900	13 655

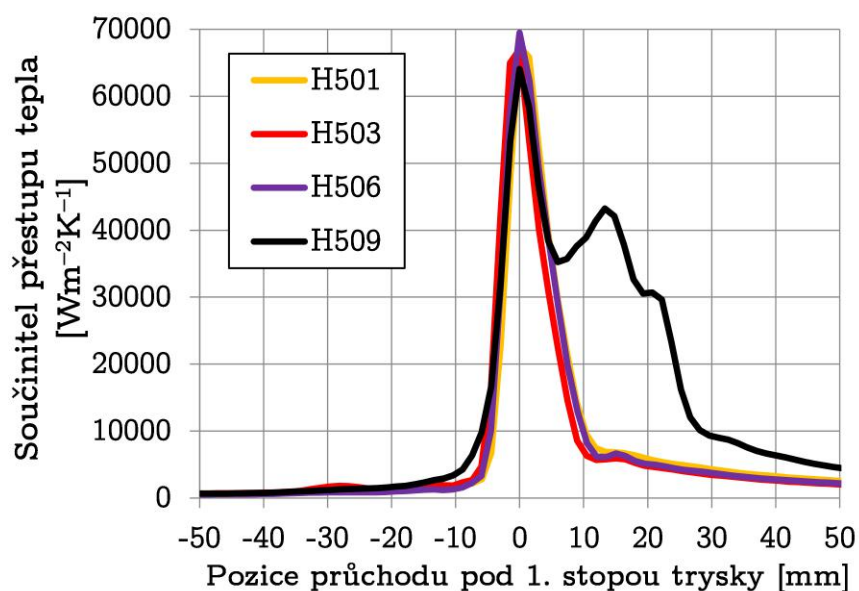
Teploty měřené termočlánkem a vypočítané teploty na povrchu vzorku jsou v závislosti na pozici vzorku zobrazeny v grafu 4.57. Teploty změřené termočlánkem jsou vykresleny plnou čarou, teploty vypočtené inverzním algoritmem čarou přerušovanou. Každému experimentu je pro přehlednost přiřazena jednotná barva. Odpovídající hodnoty součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici vzorku jsou uvedeny v grafu 4.58 a průměrné součinitele přestupu tepla jsou zobrazeny v grafu 4.59. Podrobné výsledky průběhů součinitele přestupu tepla u jednotlivých experimentů jsou uvedeny v příloze E.

Experimenty H501, H503 a H506 vykazovaly téměř identický průběh. Neprokázal se žádný významný vliv malé změny rozteče či malého úhlu natočení na průměrnou hodnotu součinitele přestupu tepla. Naopak došlo k výraznému nárůstu této hodnoty, pokud byl úhel natočení konfigurace nastaven na  $15^\circ$ . Na grafu 4.58 je experiment H509 zcela odlišný od ostatních díky dvěma výrazným maximům. Tato maxima jsou od sebe vzdálena  $13 \text{ mm}$ , což odpovídá vzdálenosti stop vodního paprsku z měření I509. První maximum dosahuje až  $64\,000 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , přestože od-

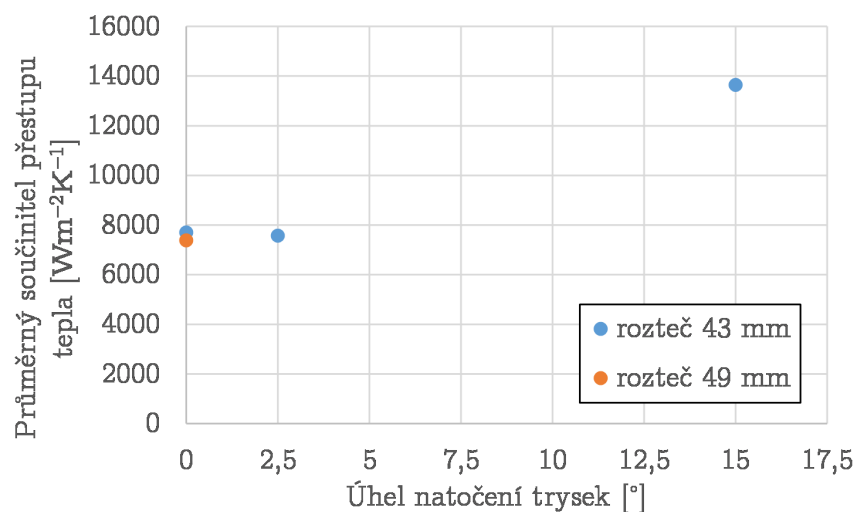
povídá redukovanému impaktnímu tlaku. Vlivem odrazu vody v překryvu dochází k intenzivnímu chlazení v celém tomto úseku. Následně dochází k postupnému poklesu součinitele přestupu tepla na minimální hodnoty.



Obr. 4.57: Průběh teploty měřené termočlánkem (plná čára) a vypočítané teploty na povrchu (přerušovaná čára) v závislosti na vzájemné pozici vzorku a pozici stopy 1. trysky pro experimenty H501, H503, H506 a H509



Obr. 4.58: Průběh součinitele přestupu tepla v závislosti na vzájemné pozici vzorku a pozici stopy 1. trysky pro experimenty H501, H503, H506 a H509



Obr. 4.59: Graf průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla v závislosti na úhlu natočení a rozteči

#### 4.5.6 | Měření kvality odkujení

Měření kvality odkujení měly za cíl prokázat, že může dojít ke kvalitativnímu rozdílu mezi oblastí překryvu a povrchu, který je standardně ostříkáván pouze jednou tryskou. Experimenty byly provedeny v souladu s postupem popsáním v kapitole 3. Hlavní parametry prezentovaných experimentů jsou shrnuty v tabulce 4.22.

Tab. 4.22: Seznam experimentů Q5XX

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Přesazení [mm]	Rozteč [mm]	Výška trysky [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Rychlost vzorku [m/s]	Material	Čas oxidace [min]	Předehřev [°C]	Teplota oxidace [°C]
Q501a	5	20	0	43	55	0	15	2	54SiCr6	10	1 300	1 240
Q509a	5	15	0	43	55	15	15	2	54SiCr6	80	990	950
Q509b	5	20	0	43	55	15	15	2	54SiCr6	10	1 300	1 240
Q511	4	40	0	43	75	0	15	2	HDT580X	120	1 240	1 200
Q512	4	40	0	43	75	2,5	15	2	HDT580X	120	1 240	1 200
Q513	4	40	-10	43	75	15	15	2	HDT580X	120	1 240	1 200



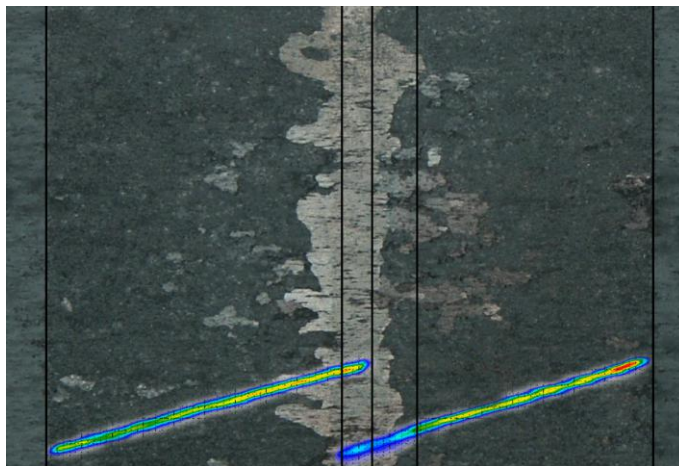
Experiment Q501a byl realizován s ocelí 54SiCr6. Konfigurace typově odpovídala experimentu I501, v tomto případě byl ovšem tlak snížen na 20 MPa, neboť tato hodnota se více blížila průmyslově používaným hodnotám. Experimenty Q509a a Q509b byly realizovány také s ocelí 54SiCr6. Konfigurace odpovídala experimentu I509, kdy byl úhel natočení  $15^\circ$ . Byly realizovány dva experimenty, Q509a pro teplotu oxidace do  $1173^\circ\text{C}$  a Q509b pro teplotu oxidace nad  $1173^\circ\text{C}$ . Dále byly k tomuto výzkumnému cíli přidány i experimenty Q511 a Q512, které částečně navazují na předchozí výzkumný cíl, neboť byl při těchto experimentech použit pár Trysky 4 a ocel HDT580X. Experiment Q511 pracuje s konfigurací trysky s nulovým úhlem natočení. Experiment Q511 pracuje s konfigurací trysky s  $0,4^\circ$  úhlem natočení.

U experimentu Q501a nebyla pozorována žádná nehomogenita v ostříkávané oblasti (viz obr. 4.60). V místě ostříku byla průměrná výška okují  $1\text{ }\mu\text{m}$ , vyskytovala se zde ovšem i místa, kde byla měřena výška až  $53\text{ }\mu\text{m}$ . Tato místa se však vyskytovala pouze ojediněle a to především v pásu washoutu. V oblasti překryvu vodních paprsků se tato maxima nevyskytovala. Mimo sekci ostříku docházelo k odloupenutí větší oblastí okují. V této oblasti byla naměřena průměrná výška  $5\text{ }\mu\text{m}$ . V místech, kde se okuje neodloupily byla změřena průměrná výška okují  $45\text{ }\mu\text{m}$ . Tyto výsledky jsou v souladu s výsledky experimentů prvního cíle dizertační práce v kapitole 4.1. Je ovšem třeba dodat, že vzhledem k odloupenutí okují ve větších celcích nelze obecně hodnotit, zda v oblasti překryvu při nulovém natočení trysek dochází k lepšímu či horšímu odstranění okují.



Obr. 4.60: Výsledek experimentu Q501a na oceli křemíkové 54SiCr6 při teplotě oxidace nad  $1173^\circ\text{C}$  při úhlu natočení  $0^\circ$

U experimentu Q509a byla zvolena nižší teplota oxidace za účelem větší drobiivosti okují a také aby docházelo k pomalejšímu nárůstu okují a bylo zamezeno vzniku fayalitu. Výsledek experimentu ukazuje obr. 4.61. V tomto případě došlo k odstranění okují v oblasti překryvu trysek. Průměrná výška zbytkových okují byla  $1\text{ }\mu\text{m}$ . Oblast, která byla ostříkána pouze jednou tryskou ovšem vykazovala průměrnou výšku okují  $32\text{ }\mu\text{m}$  (resp.  $31\text{ }\mu\text{m}$  v druhé polovině oblasti). Mimo oblast ostříku byla průměrná výška okují pro jednotlivé oblasti mezi  $36$  až  $49\text{ }\mu\text{m}$ . V oblasti tzv. washoutu docházelo k odstranění okují ve zhruba polovině této oblasti, přestože zde byl tlak vodního paprsku redukován. Tento fakt byl způsoben především tím, že se vytvořené okuje odlupovaly z povrchu v malých lupíncích, které z oblasti překryvu trysek zasahovaly i do sousední oblasti washoutu.



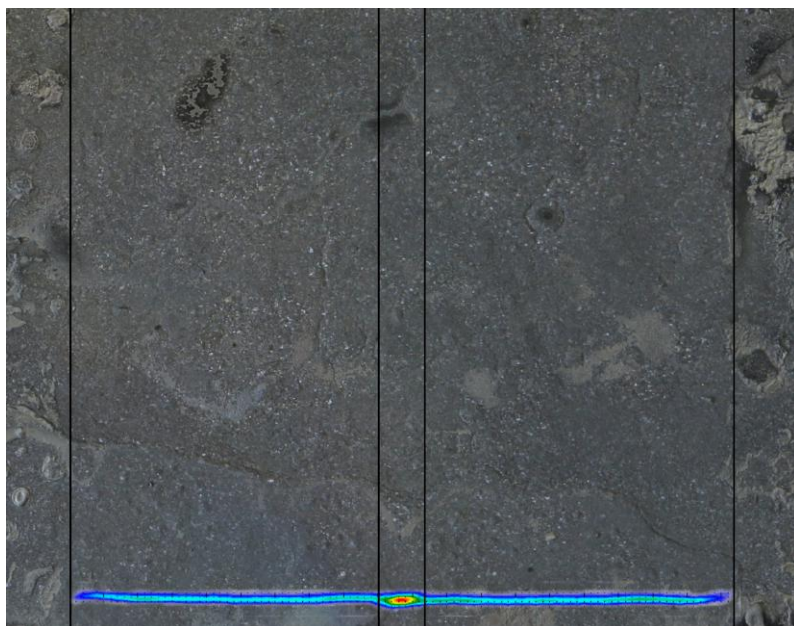
Obr. 4.61: Výsledek experimentu Q509a na oceli křemíkové 54SiCr6 při teplotě oxidace pod 1173 °C při úhlu natočení 15°

Při zvýšení teploty oxidace experimentu Q509b došlo k podobnému výsledku jako v případě experimentu Q501b (viz 4.61). V místě ostříku byly okuje odstraněny s výjimkou bodových oblastí, kde výška okují dosahovala až 40  $\mu\text{m}$ . Mimo oblast ostříku byla průměrná výška okují 44  $\mu\text{m}$ . Rozdíl mezi oblastí překryvu a standardním úsekem nebyl pozorován, docházelo ovšem opět k odstranění okují ve velkých celcích a nelze tedy kvalifikovaně zhodnotit, zda by byl vůbec tento rozdíl při daných podmínkách pozorovatelný.



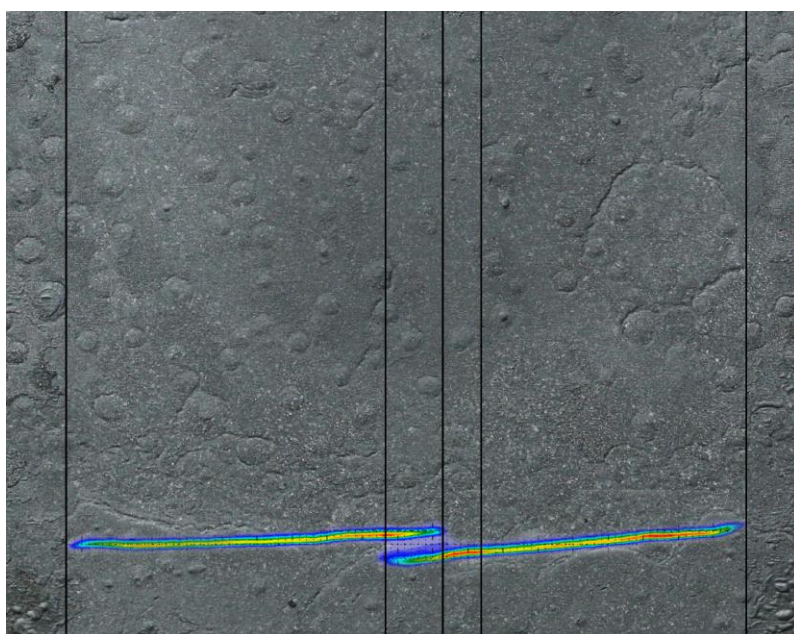
Obr. 4.62: Výsledek experimentu Q509b na oceli křemíkové 54SiCr6 při teplotě oxidace nad 1173 °C při úhlu natočení 15°

Experiment Q511 propojuje předchozí cíl práce s aktuálním. Experiment byl proveden s Tryskou 4 a konfigurací s úhlem natočení 0°. Byla použita ocel HDT580X, pro kterou se při stejných parametrech oxidace potvrdil rozdílný vliv na okuje v oblasti washoutu v rámci experimentu Q406. Tato ocel a parametry oxidace měly tedy i zde poměrně dobrý předpoklad pro prokázání vlivu úhlu natočení kvalitu odkujení. Výsledek experimentu Q511 ilustruje obr. 4.63. Experiment nepotvrdil, že by v oblasti překryvu trysek docházelo k odlišné kvalitě odkujení. V celé ostříkávané ploše byla průměrná výška zbytkových okují 7  $\mu\text{m}$ . Směrodatná odchylka měření byla 3,9  $\mu\text{m}$ .



Obr. 4.63: Výsledek experimentu Q511 na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C při úhlu natočení 0°

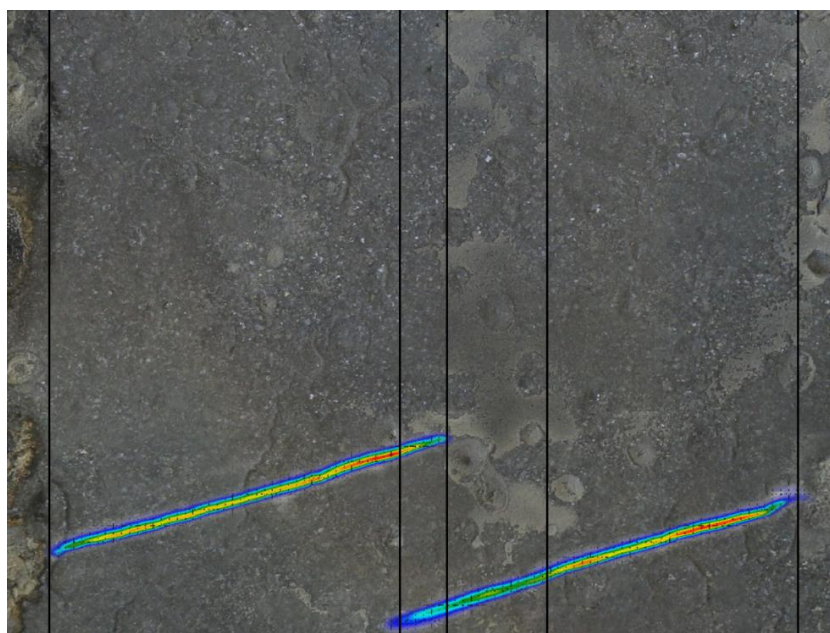
Experiment Q512 navázal na experiment Q511. V konfiguraci došlo pouze ke změně úhlu natočení na 2,5° tak, aby nedošlo ke srážce vodních paprsků nad povrchem vzorku. I jako v případě předchozího experimentu, nebyl pozorován rozdíl v kvalitě odkujení mezi jednotlivými oblastmi (viz obr. 4.64). Průměrná výška zbytkových okujů byla 6,8  $\mu\text{m}$ . Směrodatná odchylka měření byla 3,3  $\mu\text{m}$ .



Obr. 4.64: Výsledek experimentu Q512 na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C při úhlu natočení 2,5°



Experiment Q513 je totožný s experimentem Q406, který byl uveden v předchozím cíli práce. Struktura okují na povrchu je (pro úplnost tohoto cíle práce) uvedena na obr. 4.65. Průměrná výška okují původní vrstvy byla 132  $\mu\text{m}$ , odkujená vrstva pak dosahovala výšky 12  $\mu\text{m}$ . V oblasti washoutu byla průměrná výška vrstvy 43  $\mu\text{m}$ . Oblast washoutu u tohoto experimentu byla široká, což způsobovalo především nenulové přesazení trysek vůči sobě ve směru válcování. V oblasti překryvu trysek bylo pozorováno, že část okují nebyla dostatečně odstraněna a to především na straně této oblasti, která sousedila s oblastí washoutu.



Obr. 4.65: Výsledek experimentu Q513 na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C při úhlu natočení 15°

### 4.5.7 | Závěr výzkumného cíle

Pátý výzkumný cíl se svým rozsahem a variabilitou experimentů řadí mezi nejvíce komplexní části dizertační práce. Zpracovává v různých fázích 12 různých konfigurací pomocí 5 různých metod měření. Určující částí pro výběr konkrétních konfigurací bylo měření impaktních tlaků.

Výsledky experimentů posuzujících impaktní tlak jednotlivých konfigurací ukázaly, že drobné variace roztečí trysek nemají vliv na rozložení impaktního tlaku. Úhlem natočení trysek je pak částečně potlačena nehomogenita rozložení impaktního tlaku po šířce. Úhel natočení 2,5° byl z hlediska rozložení impaktního tlaku po šířce nejbližší konstantnímu průběhu. Zároveň bylo prezentováno, jak velký vliv může mít opotřebením trysek v provozu na samotné rozložení impaktního tlaku. V prezentovaném případě šlo o redukci z průměrného maximálního tlaku u nové trysky 6,32 MPa na tlak 4,27 MPa u trysek opotřebených. Tento pokles tedy představuje zhruba 32 % původní hodnoty.<sup>4</sup>

Výsledky erozivních experimentů pak ukázaly, že eroze vodního paprsku je pro úhel natočení trysek 0° a 5° velmi podobná. Při úhlu 15° již ovšem dochází k významné redukci erozivního účinku. Podobný výsledek byl zaznamenán u měření homogenity chlazení. Konfigurace s úhlem natočení 15° výrazně více chladila úsek překryvu. Měřený rozdíl (0,7 s po kontaktu vodního paprsku s povrchem) byl až 25 °C.

Experimenty na určení součinitele přestupu tepla opět nevykázaly výrazný rozdíl výsledků při změně rozteče či při změně úhlu natočení do 2,5°. Byl ovšem opět potvrzen velký vliv 15° úhlu natočení na součinitel přestupu tepla. Maxima součinitele přestupu tepla u měření H509 odpovídala pozicím stop vodních paprsků experimentům I509. Nárůst průměrného součinitele přestupu tepla byl oproti standardně prezentované konfiguraci H501 o 77 %.

Měření kvality odkujení naopak ukázaly, že u některých typů ocelí a režimů oxidace dochází v oblasti překryvu trysek k lepší efektivitě odstraňování okujů v případě, kdy je úhel náklonu nastaven na 15°. U experimentu Q513 byl ovšem pozorován i opačný jev, kdy širší oblast washoutu způsobila snížení efektivit odstraňování okujů, která se částečně objevila i v oblasti překryvu. U konfigurací s úhlem nastavení do 2,5° nebyla pozorována tato nehomogenita a ostříkovaná plocha byla homogenně odkujena nebo byly okuje odstraněny ve velkých celcích a nebylo tedy možné kvalifikovaně rozhodnout, zda k významnému rozdílu dochází.

Závěrem experimentů měření kvality odkujení se může jevit konfigurace s úhlem

---

<sup>4</sup>Tento pokles nebyl překvapivě zaznamenán v případě, kdy došlo u opotřebené trysky k výměně stabilizátoru za nový. Lze tedy předpokládat, že většina způsobené redukce tlaku je způsobena právě opotřebením a postupným ucpáváním stabilizátoru nečistotami.

natočení  $15^\circ$  jako optimální, neboť v oblasti překryvu může docházet naopak ke zvýšení efektivity odkujení. Opak je ovšem pravdou, neboť velkým natočením dochází zároveň i k rozšíření oblasti washoutu a tím i redukci efektivity odkujení dané konfigurace v oblasti hned vedle překryvu (viz závěry předcházejícího cíle práce a experimentu Q513). Tím se nerovnoměrnost odkujení po šířce válcovaného materiálu může ještě více prohloubit. Optimální nastavení konfigurace je tedy pro úhel natočení mezi  $0^\circ$  až  $5^\circ$ . Optimální rozteč trysek je taková, aby zaručovala vznik alespoň minimálního pásu překryvu a aby tento překryv představoval do 10 % standardní ostříkávané šířky konfigurace. Pokud se rozteč pohybuje v popsanych mezích, pak nemá její malá změna na proces odkujení významný vliv.

## 4.6 | Studium vlivu rychlosti posuvu ve směru válcování na součinitel přestupu tepla

Poslední bod dizertační práce zkoumá vliv rychlosti posuvu válcované oceli na součinitel přestupu tepla. Pro tento cíl byly vybrány 4 trysky: Tryska 1, Tryska 2, Tryska 5 a Tryska 6. Později ve fázi vyhodnocování již naměřených experimentů byla dodatečně přidána i Tryska 9. Parametry jednotlivých trysek lze nalézt v tabulce 4.23. Trysky byly záměrně vybrány ve dvou párech. Trysky 1 a 2 byly zvoleny jako trysky s nižším průtokem vody od výrobců A a B. Trysky 5 a 6 byly zvoleny jako trysky s vyšším průtokem vody od výrobců C a A. Tryska 9 byla přidána později a doplnila předchozí měření o další rychlost, 0,3 m/s.

Tab. 4.23: Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody

Označení trysky	Výrobce	Úhel rozstříku $\alpha_{nom}$ uváděný výrobcem [°]	Průtok vody tryskou při 10 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 20 MPa [l/min]	Průtok vody tryskou při 40 MPa [l/min]	Průtok vody pro 20 MPa na stupeň [l/min/°]
Tryska 1	A	40	12	17	24	0,43
Tryska 2	B	52	12,3	17,3	24,5	0,33
Tryska 5	C	45	29	41	58	0,91
Tryska 6	A	40	28	39,6	56	0,99
Tryska 9	C	27	67,7	95,7	135	3,54

### 4.6.1 | Impaktní tlak trysek

Pro všechny trysky byl změřen impaktní tlak vybrané konfigurace pro lepší představu o působících silách a rozložení tlaku od vodního paprsku. Seznam konfigurací shrnuje tabulka 4.24.

Trysky 1, 2, 5 a 6 byly proměřeny při pracovním tlaku 20 MPa. Výšky umístění trysek byly určeny tak, aby byl průtok vody na 1 mm šířky stopy srovnatelný v rámci příslušné dvojice trysek. Tryska 9 byla proměřena při pracovním tlaku 30 MPa ve výšce 150 mm a měla výrazně větší hloubku paprsku.

Z experimentů byla stanovena šířka stopy trysku, průměrný maximální impaktní tlak a hloubka stopy paprsku. Samotné výsledky měření jsou pak prezentovány v příloze F<sup>5</sup>.

Tab. 4.24: Seznam experimentů I6XX a jejich výsledků

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Výška [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Šířka stopy [mm]	Průměrný maximální impaktní tlak [MPa]	Hloubka stopy paprsku [mm]
I601	1	20	79	0	15	66,5	0,63	1,86
I604	2	20	75	0	15	68,5	0,70	1,56
I607	5	20	93	0	15	76,5	1,07	2,54
I611	6	20	86	0	15	76	1,24	2,25
I614	9	30	150	0	15	83	1,57	4,46

#### 4.6.2 | Součinitel přestupu tepla

V rámci dizertační práce bylo realizováno 14 experimentů pro měření součinitele přestupu tepla. Seznam jednotlivých měření se specifikací nastavení trysek, počáteční teploty ostříkovaného povrchu a rychlostí pohybu vzorku shrnuje tabulka 4.25. Pro všechny experimenty byla nastavena jednotná teplota ohřevu 900 °C. Trysky 1, 2, 5 a 6 byly testovány při rychlostech, které se mohou v běžném provozu vyskytnout na trati. Konkrétně se jednalo o rychlosti 0,5 m/s, 1 m/s a 2 m/s.

Výška trysek byla stanovena tak, aby vypočítaný průtok vody na 1 mm šířky stopy trysky byl přibližně stejný a aby v rámci měření trysek mohlo dojít vždy k porovnání páru mezi sebou. Při výpočtu průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky byl použit odhad průtoku vody dle katalogového listu trysky. Šířka stopy trysky byla stanovena experimentálně z měření impaktního tlaku. Tryska 2 má tedy nastavenou nižší výšku, než Tryska 1, čímž se částečně kompenzuje větší úhel rozstříku Trysky 2. Podobně je přistoupeno i k páru Trysek 5 a 6.

Dále byl pro studijní účely zařazen i experiment H607, který studoval přestup tepla při velmi pomalé rychlosti posuvu 0,1 m/s, a experiment H614, který studoval přestup tepla při rychlosti posuvu 0,3 m/s.

<sup>5</sup>Měření I604 se shoduje s měřením I202. Je zde ovšem uvedeno pod označením I604 pro lepší přehlednost v textu.



Při měření docházelo k mírným variacím vstupního tlaku, kdy tlak přiváděný na trysku byl o 2–5 % vyšší než tlak předem nastavený. Tyto variace se vyskytly především u experimentů H601 až H606 v rámci skupiny trysek s nižším průtokem a jsou zaznamenány v tabulce 4.25.

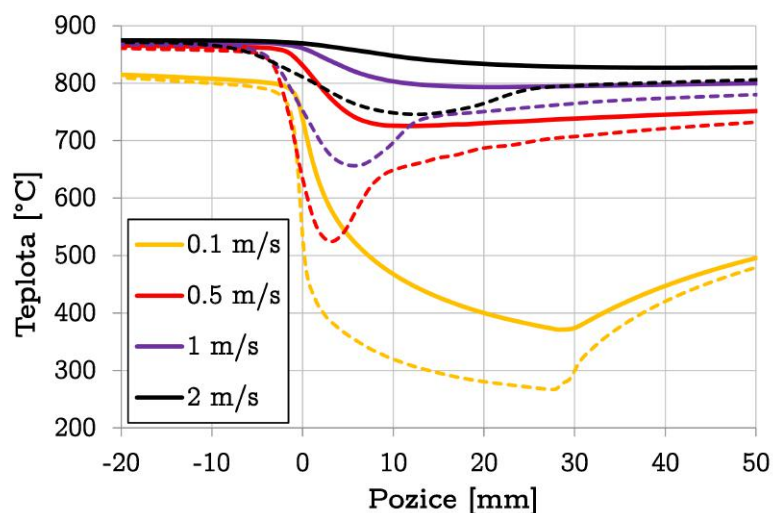
Tab. 4.25: Seznam experimentů H6XX a jejich výsledků

Měření	Tryska	Tlak [MPa]	Výška [mm]	Úhel natočení [°]	Úhel náklonu [°]	Průtok vody na mm šířky stopy [l/(min·mm)]	Rychlost vzorku [m/s]	Teplota [°C]	Průměr součinitele přestupu tepla [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
H601	1	21	79	0	15	0,262	0,5	900	3 993
H602	1	21	79	0	15	0,262	1	900	3 566
H603	1	21	79	0	15	0,262	2	900	3 080
H604	2	20,5	75	0	15	0,256	0,5	900	3 584
H605	2	20,5	75	0	15	0,256	1	900	3 118
H606	2	20,5	75	0	15	0,256	2	900	3 169
H607	5	20	93	0	15	0,536	0,1	900	10 522
H608	5	20	93	0	15	0,536	0,5	900	5 521
H609	5	20	93	0	15	0,536	1	900	4 722
H610	5	20	93	0	15	0,536	2	900	4 522
H611	6	20	86	0	15	0,521	0,5	900	5 039
H612	6	20	86	0	15	0,521	1	900	4 798
H613	6	20	86	0	15	0,521	2	900	4 252
H614	9	30	150	0	15	1,410	0,3	900	10 716

Experimenty byly realizovány postupem popsáním v kapitole 3 a sekci 3.4.1. Pro přehlednou prezentaci výsledků byla vybrána pouze Tryska 5, neboť se jedná o trysku, která byla měřena jak při rychlostech vyšších, tak při rychlosti 0,1 m/s. Tyto výsledky pak byly prezentovány i v rámci konference METAL 2017 v příspěvku [A9].

### Výsledky měření

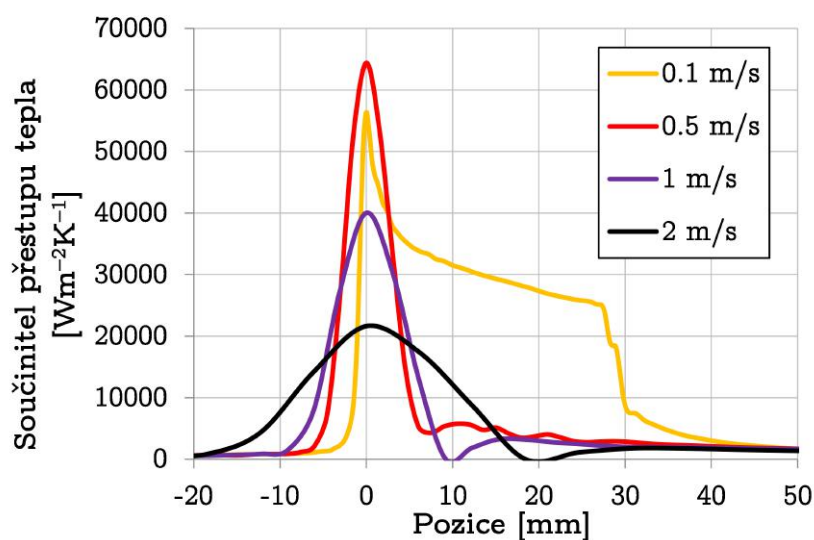
Tryska 5 byla měřena při rychlostech 0,1 m/s, 0,5 m/s, 1 m/s a 2 m/s. Průběh teploty, závislé na pozici vzorku, měřené termočlánkem je zobrazen na obrázku 4.66.



Obr. 4.66: Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 5

Na obrázku je dále zobrazena i teplota na povrchu vzorku, vypočtená pomocí inverzního algoritmu. Každé rychlosti je přiřazena jedna odpovídající barva. Teplota měřená termočlánkem je označena plnou čarou. Vypočtená teplota na povrchu je označena čárkovaně.

Příslušný součinitel přestupu tepla je zobrazen v grafu na obrázku 4.67. V dů-

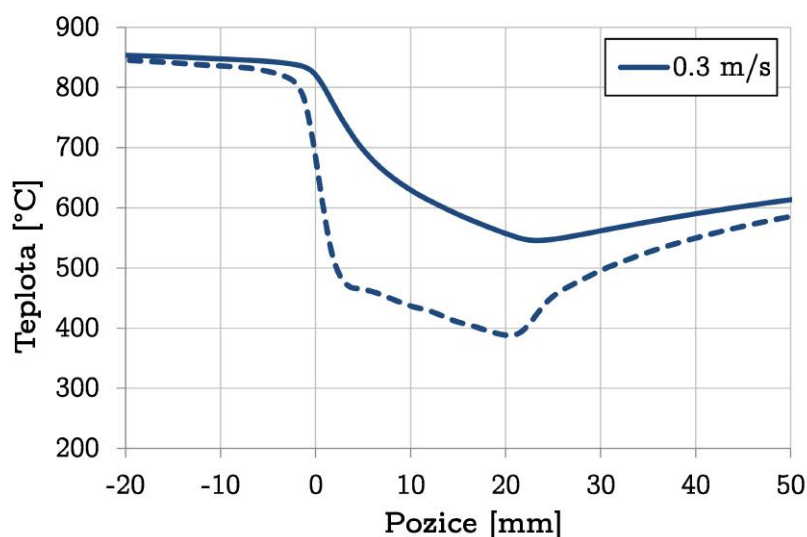


Obr. 4.67: Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 5

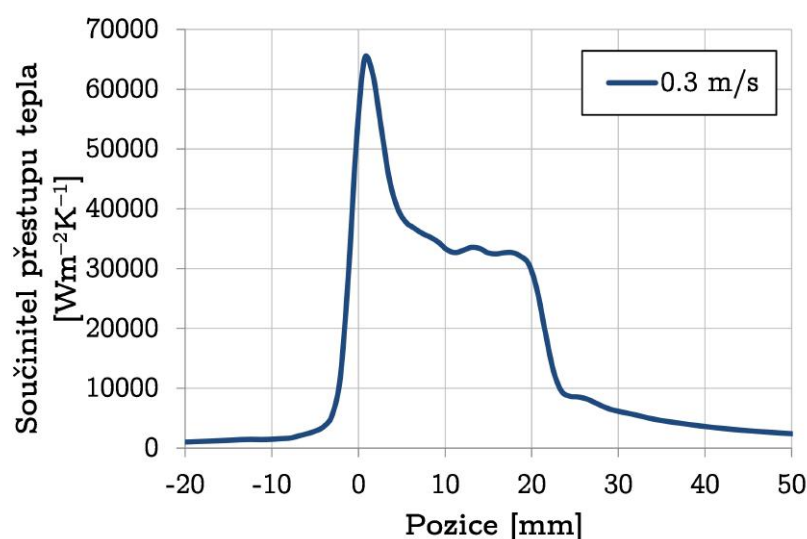
sledku různých rychlostí pohybu vzorku dochází v rámci měření a výpočtů k různé míře tzv. rozmazání dat, což má za následek, že nelze porovnávat jednotlivé průběhy chlazení pomocí maxima daných křivek v grafu. Lze nicméně konstatovat, že z měření pro všechny měřené typy trysek a rychlosti 0,5 m/s, 1 m/s a 2 m/s lze charakterizovat průběh součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici jako funkci s jedním výrazným maximem. Na obou stranách tohoto maxima pak dochází k rychlému poklesu na hodnoty řádově nižší.

Pro rychlost 0,1 m/s byla ovšem pozorována zcela rozdílná závislost. V místě kontaktu vody a povrchu oceli byl zaznamenán prudký nárůst součinitele přestupu tepla a jeho maximální hodnota. Následně ovšem docházelo k velmi pozvolnému klesání křivky. Lze tedy usoudit, že v úseku až do 30 mm za stopou trysky dochází k intenzivnímu chlazení, které je pravděpodobně způsobeno vypařováním vody, která se v této oblasti hromadí díky velkému podchlazení samotného povrchu až pod Leidenfrostovu teplotu.

Podobný výsledek byl zaznamenán i pro Trysku 9 při rychlosti posuvu 0,3 m/s. Tryska 9 byla měřena samostatně pro jedinou rychlost a nelze ji tedy porovnávat s předchozími měřeními. Vývoj teploty ovšem ukázal podobně intenzivní úsek chlazení za samotnou stopou trysky (viz obr. 4.68). Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici vzorku odhalil podobný průběh jako v případě experimentu H607 (viz 4.69). Délka úseku intenzivního chlazení byla tentokrát zhruba 22 mm.



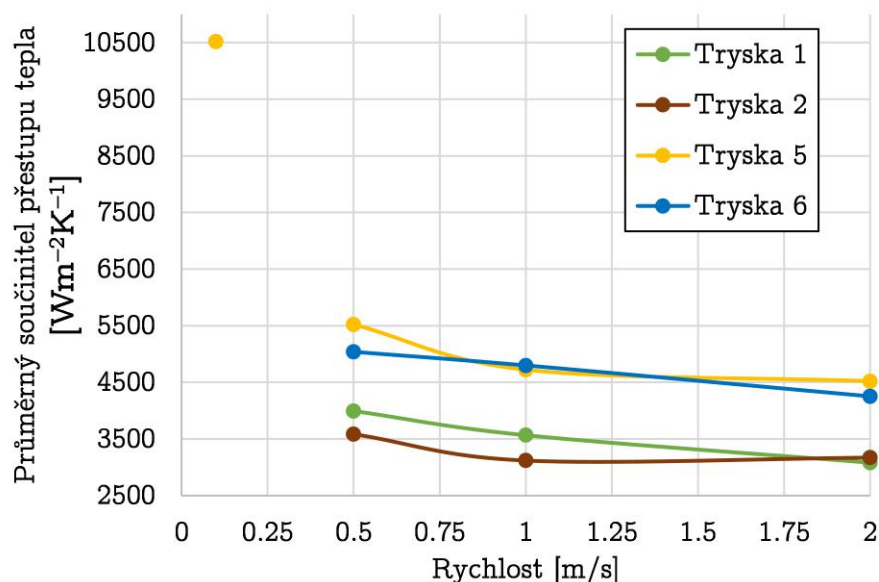
Obr. 4.68: Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 9



Obr. 4.69: Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 9

### Průměrný součinitel přestupu tepla

Pro lepší porovnatelnost měření je dále zavedena veličina tzv. průměrného součinitele přestupu tepla, která se vypočítá jako průměrná hodnota úseku mezi pozicí  $-50$  a  $50$  mm. Průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla pro experimenty H601 až H613 jsou zaneseny v grafu 4.70. Každé z trysek je zde přiřazena konkrétní barva a toto barevné schéma se pro lepší přehlednost zachovává i v následujících grafech.



Obr. 4.70: Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na rychlosti

V grafu jsou výsledky pro každou trysku při rychlostech  $0,5$  m/s,  $1$  m/s a  $2$  m/s graficky spojeny pro lepší vizuální znázornění. Měření H607 je umístěno odděleně

díky již dříve popsaným skutečnostem. Na grafu je vidět oddělení dvou skupin trysek dle průtoku. Trysky 1 a 2 s nižším průtokem mají i nižší průměrný součinitel přestupu tepla než skupina Trysek 5 a 6. U většiny trysek byl zaznamenán pokles průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na rychlosti posuvu. Jediným případem, kdy pokles zaznamenán nebyl, byly měření H605 a H606 u Trysky 2. Jednalo se zde o nárůst hodnoty o cca 1,6 %. Zde je ovšem nutno zdůraznit, že tato tryska měla velmi variabilní hodnoty impaktního tlaku (viz příloha F práce) a je tedy možné, že se i tato variabilita promítla do výsledného měření součinitele přestupu tepla.

Výchozí rychlost posuvu zvolíme 1 m/s. Z dat vyplývá, že pokud rychlost posuvu snížíme na polovinu, tedy na 0,5 m/s, dojde o zvýšení průměrného součinitele přestupu tepla v průměru o 12,2 %. Minimální procentuální rozdíl byl zaznamenán pro Trysku 6 a to o 5 %. Maximální procentuální rozdíl byl zaznamenán pro Trysku 5 a to o cca 16,9 %. Pokud rychlost naopak zvýšíme na dvojnásobek, tedy na 2 m/s, dojde k poklesu průměrného součinitele přestupu tepla o 6,9 %. Minimální rozdíl byl zaznamenán u Trysky 2 a možné důvody byly uvedeny výše. Maximální pokles byl zaznamenán u Trysky 1 a jednalo se o 13,6 %.

### Regresní modely pro průměrný součinitel přestupu tepla

Pro každou rychlost byl z těchto dat stanoven regresní model, který určuje závislost součinitele přestupu tepla na průměrném průtoku vody na milimetr šířky stopy. Výsledky jsou prezentovány v grafech na obr. 4.71, 4.72 a 4.73.

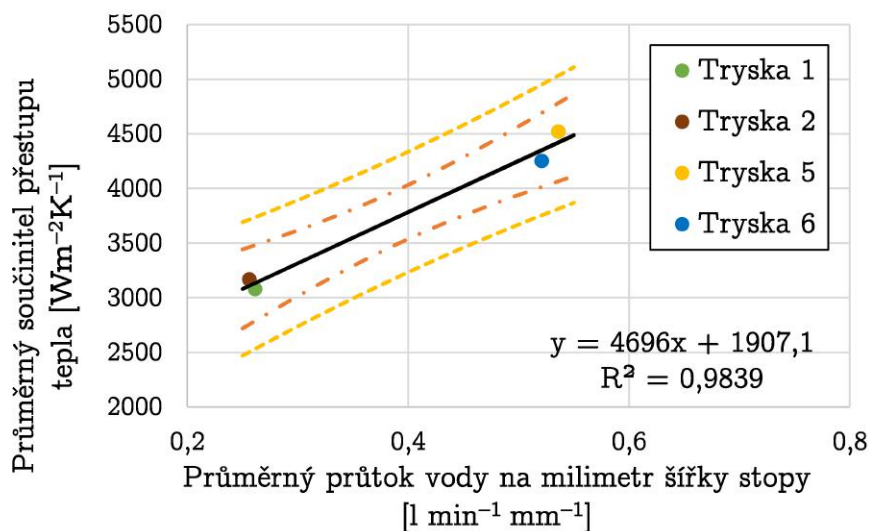
Barevně jsou zde zobrazena jednotlivá měření. Černě příslušné regresní funkce. Oranžové meze určují oblast konfidenčního intervalu, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet i skutečný výsledek regresní funkce. Žlutě je označen predikční interval, tedy pás, kde se s 95% pravděpodobností bude nacházet libovolné další měření, které bude provedeno za stejných podmínek, jako měření určující danou regresní funkci.

Konfidenční i predikční intervaly jsou ve všech případech poměrně široké především z důvodu malého počtu měřených dat. Nicméně ve všech případech byl lineární koeficient u regresních funkcí statisticky významný. Veličina průměrného průtoku vody na 1 mm šířky stopy tedy má měřitelný vliv na velikost průměrného součinitele přestupu tepla.

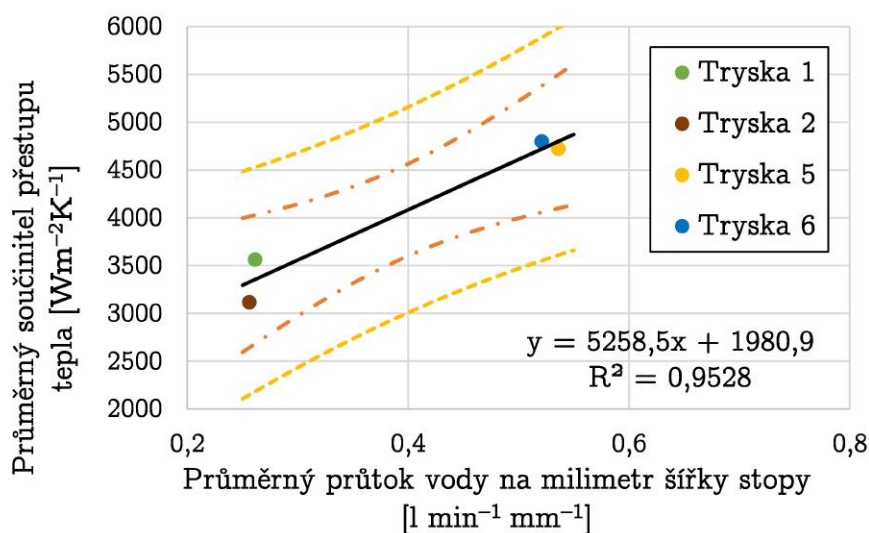
Při rychlosti 2 m/s byla pozorována vůbec nejmenší variabilita. Graf výsledků měření a regresní funkce je na obr. 4.71. Průměrný součinitel přestupu tepla  $h_p$  lze při této rychlosti odhadnout regresní funkcí

$$h_p = 4696 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} + 1907 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right];$$

kde  $Q_{exp}$  označuje vypočítaný průtok tryskou při experimentálně nastaveném tlaku  $p_{exp}$  a  $l_{exp}$  označuje experimentálně změřenou šířku stopy vodního paprsku. Koeficient determinace byl 0,98.<sup>6</sup>



Obr. 4.71: Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky při konstantní rychlosti posuvu vzorku 2 m/s



Obr. 4.72: Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky při konstantní rychlosti posuvu vzorku 1 m/s

<sup>6</sup>Regresní model, který zahrnoval širší spektrum experimentů při rychlosti 2 m/s byl již uveden v kapitole 4.3.

Stejným způsobem byla určena regresní rovnice pro případ rychlosti 1 m/s:

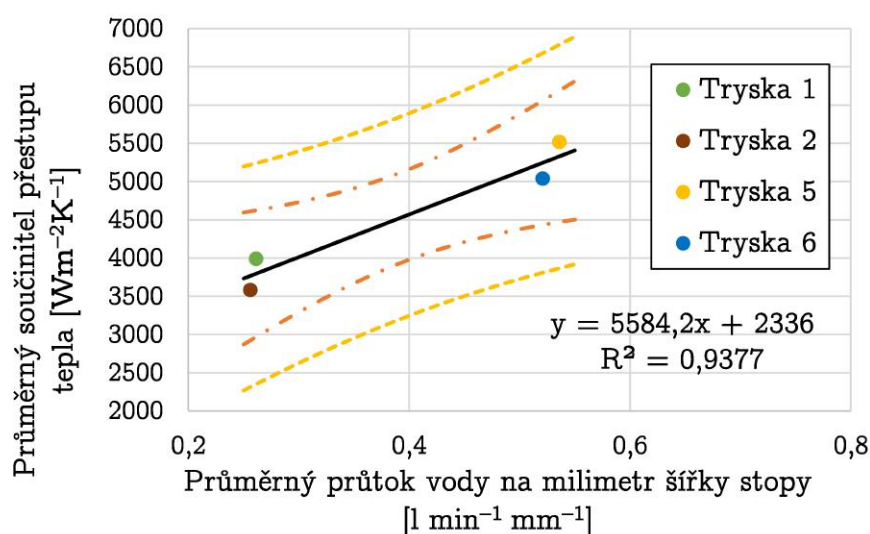
$$h_p = 5\,259 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} + 1\,981 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right].$$

Koeficient determinace byl 0,95. Graf výsledků měření a regresní funkce je na obr. 4.72.

Podobně pro případ rychlosti 0,5 m/s byla stanovena regresní funkce:

$$h_p = 5\,584 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} + 2\,336 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right].$$

Koeficient determinace byl 0,94. Graf výsledků měření a regresní funkce je na obr. 4.73.

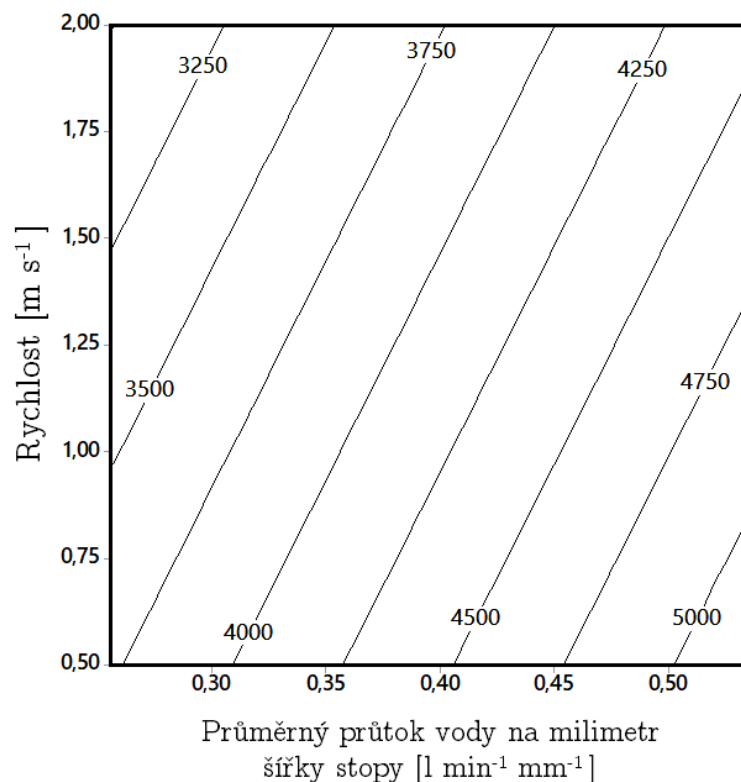


Obr. 4.73: Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky při konstantní rychlosti posuvu vzorku 0,5 m/s

Z výsledků experimentů lze regresní analýzou určit i společnou závislost průměrného součinitele přestupu tepla na rychlosti posuvu a na průměrném průtoku vody na milimetr šířky stopy. Analýza ukázala, že koeficienty příslušející členům druhého řádu v rovnici nejsou statisticky významné. Závislost lze tedy kvalitně modelovat jako plochu

$$h_p = 5\,180 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} - 487 v + 2\,643 \quad \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right].$$

Koeficient determinace byl 0,94. Graf kontur regresní plochy je na obr. 4.74.



Obr. 4.74: Graf kontur regresní plochy určující závislost průměrného součinitele přestupu tepla  $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$  v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky a rychlosti posuvu

#### 4.6.3 | Závěr výzkumného cíle

Experimenty prokázaly, že při běžných rychlostech válcování za studena dochází k intenzivnímu chlazení povrchu pouze v bezprostředním místě dopadu vodního paprsku. Míra tohoto chlazení závisí jak na rychlosti pohybu chlazeného vzorku, tak na aktuálním průtoku vody tryskou a jejím úhlu rozstříku. Zvýšením rychlosti válcování lze snížit průměrný součinitel přestupu tepla až o 23 % (případ Trysky 1 a zvýšení rychlosti z 0,5 m/s na 2 m/s). Toto extrémní zvýšení rychlosti může být ovšem vykoupeno horší odkujitelností okujů na povrchu oceli, neboť mechanická složka vodního paprsku působí po kratší dobu. Při extrémně pomalých rychlostech (0,3 m/s a 0,1 m/s) docházelo k intenzivnímu chlazení za stopou trysky a proto tyto rychlosti nelze doporučit pro jakoukoliv aplikaci v průmyslu.





# Závěr

Práce se zabývá vývojem nových přístupů v odstraňování okují při kontinuální výrobě oceli s využitím vysokotlakého vodního paprsku. Proces odstraňování okují je zkoumán jako komplexní fyzikálně-chemický proces a práce klade především důraz na vliv změny jednotlivých parametrů nastavení trysek na dynamiku celého procesu. Výsledkem analýz práce je soubor doporučení, která lze snadno v průmyslu zavést bez složitého přebudování současných technologií.

Teoretická část poskytuje ucelený přehled o tvorbě okují a jejich mechanismu odstraňování. Praktická část je pak rozdělena na 6 částí, které studují vliv změny jednotlivých parametrů na vývoj celého procesu a odpovídají jednotlivým cílům dizertační práce.

První cíl práce se zabýval dynamikou růstu okují na povrchu oceli v závislosti na čase a teplotě. Komplexně zde byly zkoumány vzorky křemíkové pružinové oceli 54SiCr6 při teplotách 900, 1 050 a 1 200 °C a časech 15, 30, 45, 60 a 120 minut. Výška a struktura okují byla analyzována pomocí mikroskopu a byl vytvořen příslušný regresní model. Regresní modely odpovídaly předem předpokládané parabolické závislosti tloušťky oxidů  $z_p(t)$  na času oxidace  $t$ :  $z_p(t) = k(T)\sqrt{t} + a$ . Parametr rychlosti růstu okují  $k(T)$  se vzrůstající teplotou  $T$  rostl. Výsledky experimentů při teplotě 1 200 °C vykazovaly širší konfidenční interval, který byl způsoben změnou struktury okují. Při této teplotě došlo k postupnému rozdělování vrstvy okují na dvě podvrstvy, horní a spodní. Lze předpokládat, že horní vrstva nebude klást při procesu odkujení výraznější odpor. Spodní vrstva okují ovšem bohužel vrůstala do materiálu oceli a může tedy představovat technologický problém. Dále byla v rámci tohoto cíle analyzována struktura okují na oceli HDT580X pro teplotu ohřevu 1 200 °C a dobu 120 minut. Vytvořené okuje se částečně odlupovaly a tím se redukovala jejich výška. Výška oxidované vrstvy byla 132  $\mu\text{m}$ , redukované 38  $\mu\text{m}$ .

Druhý cíl se zaměřil na vliv délky stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku trysky. Pro tento účel byly vybrány dva typy trysek od dvou různých výrobců s odlišnými úhly rozstříku: Tryska 2 a Tryska 4. V obou případech došlo ke zvýšení průměrného maximálního impaktního tlaku trysky při výměně kratšího stabilizátoru za delší. U Trysky 2 se jednalo o zlepšení o 11 %, u Trysky 4 o 4 %. U obou trysek byla v rámci porovnávaných experimentů téměř totožná síla působící na měřící podložku, což potvrzuje předpoklad, že delší stabilizátory přispívají k lepší fokusaci vodního

paprsku a tím i k lepší mechanické efektivitě odstraňování okují.

Třetí cíl se věnoval zpracování fotografií proudu plochého vysokotlakého vodního paprsku. Fotografie byly pořízeny stínografickou metodou. Bylo prokázáno, že s rostoucí výškou se struktura paprsku mění a z hlediska struktury lze rozlišit tři úseky se třemi strukturami vodního paprsku: úsek s kompaktní strukturou paprsku, úsek postupného rozpadu této struktury a úsek, kdy je již struktura vodního paprsku tvořena pouze drobnými kapkami. Ukázalo se, že pro většinu trysek s velkým úhlem rozstříku a nižším průtokem dochází k rozpadu kompaktní struktury velmi záhy u ústí trysky. Ve standardní výšce, která je používána u odkujovacích trysek (50–200 mm), byl u testovaných Trysek 1, 2, 5 a 6 již pozorován částečný či úplný rozpad kompaktnosti struktury vodního paprsku. Navazující experimenty pro určení součinitele přestupu tepla ukázaly, že předpokládaný průměrný součinitel přestupu tepla se může lišit dle struktury vodního paprsku. Pro případy, kdy k došlo k rozpadu vodního paprsku, byla provedena regresní diagnostika. Průměrný součinitel přestupu tepla při rychlosti válcování 2 m/s lze v těchto případech vyjádřit v závislosti na průtoku a šířce stopy trysky následující regresní rovnicí

$$h_p = 5\,215,9 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} + 1\,954,8 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right],$$

kde  $Q_{exp}$  označuje vypočítaný průtok tryskou při experimentálně nastaveném tlaku  $p_{exp}$  a  $l_{exp}$  označuje experimentálně změřenou šířku stopy vodního paprsku. Tato regresní rovnice popisuje přibližně 75 % variability souboru 13 experimentů.

Čtvrtý cíl zkoumal vliv změny tlaku a vzájemného přesazení trysek na šířku oblasti tzv. washoutu, kde je impaktní tlak pravé trysky konfigurace redukován proudem trysky levé. V úvodu této části byl představen geometrický model, který šířku této oblasti teoreticky předpověděl a vytyčil hlavní parametry konfigurace trysek, které mají na tuto oblast vliv. Jedná se především o úhel rozstříku  $\alpha$ , úhel náklonu  $\beta$  a úhel natočení  $\gamma$  a přesazení trysek ve směru válcování  $S$ . Experimenty stanovující rozložení impaktního tlaku pak tento model potvrdily. Experimenty naopak neprokázaly, že by měl tlak statisticky významný vliv na šířku této oblasti. Navazující měření kvality odkujení povrchu ukázala, že mohou existovat typy ocelí, na kterých se (vlivem nevhodně zvoleného nastavení trysek) může projevit nerovnoměrnost impaktního tlaku v podobě hůře odkujených pásů okují na povrchu. Přestože tato situace nastala jen za specifických podmínek, je třeba, aby tomuto problému bylo aktivně zabráněno tím, že bude šířka oblasti washoutu minimalizována. Možností minimalizace šířky washoutu je celá řada. Přesazení trysek ve směru válcování je v průmyslu nulové, v tomto případě sloužilo pouze pro plynulé redukování šířky oblasti washoutu, aby mohlo být poukázáno na tuto problematickou oblast. Geometrický model ukázal, že největší vliv mají především vysoké hodnoty úhlu  $\gamma$ , který je v provozních podmínkách mnohdy nastaven až na 15°.

Pátý výzkumný cíl navázal na problematiku cíle předchozího a využil stejný geometrický model. Podrobně se zabýval vlivem úhlu natočení  $\gamma$  a variací rozteče trysek na proces odstraňování okují v oblasti, která byla ostříkávána dvěma tryskami současně. V textu byla tato oblast označena jako oblast překryvu. Se svým rozsahem a variabilitou experimentů byl nejkomplexnější částí dizertační práce. Zpracovával v různých fázích 12 různých konfigurací pomocí 5 různých metod měření. Určující částí pro výběr konkrétních konfigurací bylo měření impaktních tlaků.

Výsledky experimentů posuzujících impaktní tlak jednotlivých konfigurací ukázaly, že drobné variace roztečí trysek nemají vliv na rozložení impaktního tlaku v této oblasti. Úhlem natočení trysek  $\gamma$  je pak částečně potlačena nehomogenita rozložení impaktního tlaku po šířce válcování. Úhel natočení  $2,5^\circ$  byl z hlediska rozložení impaktního tlaku po šířce nejbližší konstantnímu průběhu. Zároveň bylo prezentováno, jak velký vliv může mít opotřebení trysek v provozu na samotné rozložení impaktního tlaku. V prezentovaném případě šlo o redukci z průměrného maximálního tlaku u nové trysky 6,32 MPa na tlak 4,27 MPa u trysek opotřebovaných. Tento pokles tedy představuje zhruba 32 % původní hodnoty.

Výsledky erozivních experimentů pak ukázaly, že eroze vodního paprsku je pro úhel natočení trysek  $0^\circ$  a  $5^\circ$  velmi podobná. Při úhlu  $15^\circ$  již ovšem dochází k významné redukci erozivního účinku. Podobný výsledek byl zaznamenán u měření homogenity chlazení. Konfigurace s úhlem natočení  $15^\circ$  výrazně více chladila oblast překryvu. Měřený rozdíl (0,7 s po kontaktu vodního paprsku s povrchem) byl až  $25^\circ\text{C}$ .

Experimenty na určení součinitele přestupu tepla opět nevykázaly výrazný rozdíl výsledků při změně rozteče či při změně úhlu natočení do  $2,5^\circ$ . Byl ovšem opět potvrzen velký vliv  $15^\circ$  úhlu natočení na součinitel přestupu tepla. Maxima součinitele přestupu tepla u měření H509 odpovídala pozici stop vodních paprsků experimentům I509. Nárůst průměrného součinitele přestupu tepla byl oproti standardně prezentované konfiguraci H501 s nulovým natočením o 77 %.

Měření kvality odkujení naopak ukázaly, že u některých typů ocelí a režimů oxidace dochází v oblasti překryvu trysek k lepší efektivitě odstraňování okují v případě, kdy je úhel náklonu nastaven na  $15^\circ$ . U experimentu Q513 byl ovšem pozorován i opačný jev, kdy širší oblast washoutu způsobila snížení efektivit odstraňování okují, která se částečně objevila i v oblasti překryvu. U konfigurací s úhlem nastavení do  $2,5^\circ$  nebyla pozorována tato nehomogenita a ostříkovaná plocha byla homogenně odkujena nebo byly okuje odstraněny ve velkých celcích a nebylo tedy možné kvalifikovaně rozhodnout, zda k významnému rozdílu dochází.

Závěrem experimentů měření kvality odkujení se mohla jevit konfigurace s úhlem natočení  $15^\circ$  jako optimální, neboť v oblasti překryvu došlo naopak ke zvýšení efektivit odkujení. Opak je ovšem pravdou, neboť velkým natočením dochází zároveň

i k rozšíření oblasti washoutu a tím i redukci efektivity odkujení dané konfigurace v oblasti hned vedle překryvu (viz závěry předcházejícího cíle práce). Tím se nerovnoměrnost odkujení po šířce válcovaného materiálu může ještě více prohloubit. Optimální nastavení konfigurace je tedy pro úhel natočení mezi  $0^\circ$  až  $5^\circ$ . Optimální rozteč trysek je taková, aby zaručovala vznik alespoň minimálního pásu překryvu a aby tento překryv představoval do 10 % standardní ostříkávané šířky konfigurace. Pokud se rozteč pohybuje v popsanych mezích, pak nemá její malá změna na proces odkujení významný vliv.

Šestý cíl se zabýval vlivem rychlosti pohybu rozvalku na válcovací trati na součinitel přestupu tepla při odstraňování okují. Experimenty prokázaly, že při běžných rychlostech válcování za studena dochází k intenzivnímu chlazení povrchu pouze v bezprostředním místě dopadu vodního paprsku. Míra tohoto chlazení závisí jak na rychlosti pohybu chlazeného vzorku, tak na aktuálním průtoku vody tryskou a jejím úhlu rozstříku. Zvýšením rychlosti válcování lze snížit průměrný součinitel přestupu tepla až o 23 % (případ Trysky 1 a zvýšení rychlosti z 0,5 m/s na 2 m/s). Toto extrémní zvýšení rychlosti může být ovšem vykoupeno horší odkujitelností okují na povrchu oceli, neboť mechanická složka vodního paprsku působí po kratší dobu. Při extrémně pomalých rychlostech (0,3 m/s a 0,1 m/s) docházelo k intenzivnímu chlazení za stopou trysky a proto tyto rychlosti nelze doporučit pro jakoukoliv aplikaci v průmyslu.

Z výsledků experimentů byla regresní analýzou určena i společná závislost průměrného součinitele přestupu tepla na rychlosti posuvu a na průměrném průtoku vody na milimetr šířky stopy. Analýza ukázala, že koeficienty příslušející členům druhého řádu v rovnici nejsou statisticky významné. Závislost lze tedy kvalitně modelovat jako plochu

$$h_p = 5\,180 \frac{Q_{exp}}{l_{exp}} - 487 v + 2\,643 \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right],$$

kde  $Q_{exp}$  označuje vypočítaný průtok tryskou při experimentálně nastaveném tlaku  $p_{exp}$ ,  $l_{exp}$  označuje experimentálně změřenou šířku stopy vodního paprsku a  $v$  označuje rychlost válcování. Tato regresní rovnice popisuje přibližně 94 % variability souboru 12 experimentů.

Z výše uvedených výsledků práce lze pro průmyslovou praxi doporučit zavedení následujících opatření:

1. Při výběru trysek určených pro odkujovací sekci zvolit nejdelší možné stabilizátory, které výrobce dodává a které technicky vyhoví příslušnému řešení instalovaných trysek. Stabilizátory kontrolovat v pravidelných intervalech. Stabilizátory, které byly v provozu po dobu 6 měsíců snížily maximální průměrný impaktní tlak až o 32 %, je proto vhodné dělat kontroly častější. V případě

poškození postačí vyměnit pouze stabilizátor. U samotného těla trysky nebylo v experimentech ani po 6 měsících zaznamenáno výrazné poškození.

2. Úhel natočení trysek  $\gamma$  volit v intervalu od  $0^\circ$  do  $5^\circ$ . Toto nastavení zajistí proces blízký homogennímu odkujení po celé šířce odkujovací sekce. Vzhledem k přesnosti nastavení tohoto úhlu v průmyslu stačí mít tento úhel přibližně pro všechny trysky stejný. Tímto nastavením se značně redukuje šířka oblasti tzv. washoutu.
3. Rozteč trysek volit tak, aby oblasti na povrchu, které jsou současně ostříkávány dvěma tryskami, představovaly do 10 % celé ostříkované šířky. Vzhledem k parabolickému tvaru vodního paprsku a tlakové ztrátě na okrajích paprsku není vhodné toto procento volit ani příliš nízké.



# Literatura

- [1] ASAI, T., SOSHIRO, T. a MIYAHARA, D. Influence of Ni Impurity in Steel on the Removability of Primary Scales. In: *ISIJ International*. 1997. Vol. 37, No. 3, pp. 272–277.
- [2] BENEŠOVÁ, Soňa a BERNÁŠEK, Vladimír. *Technologie tváření, slévání a svařování*. Fakulta strojní ZČU v Plzni, 2014. ISBN 978-80-261-0449-0. Dostupné z: <https://www.zcu.cz/pracoviste/vyd/online/TechnologietvareniTTSS.pdf>
- [3] BERGMAN, Theodore L., INCROPERA, Frank P., LAVINE, Adrienne S. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011. ISBN 0-471-30460-3.
- [4] BLAZEVIC, D. T. *Hot strip mill operations, Volume V, Scale*. Sun Lakes, Arizona, USA, 2005.
- [5] BOHÁČEK, Jan a HORÁK, Aleš. Numerical study of droplet dynamics impinging onto steel plate covered with scale layer. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*. 2010. Vol. 5, No. 4, pp. 389–398.
- [6] Bohdan Bolzano. Technické listy oceli 54SiCr6 Bohdan Bolzano [online] Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN%2010089/MOP\\_54SiCr6\\_1.pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN%2010089/MOP_54SiCr6_1.pdf).
- [7] Bohdan Bolzano. Technické listy oceli S235JR Bohdan Bolzano [online] Dostupné z: [https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP\\_%20Tycova\\_ocel/EN\\_10025/MOP\\_prehled\\_vlastnosti\\_S235JR.pdf](https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10025/MOP_prehled_vlastnosti_S235JR.pdf).
- [8] BRANDT, Daniel A. a WARNER, J. C. *Metallurgy fundamentals*. 4th Ed. Tinley Park: Goodheart-Willcox Publisher, 2005. ISBN 1-59070-345-6.
- [9] BRESLAVKSY, D. European Steel and Alloy Grades [online] Dostupné z: <http://www.steelnumber.com>.
- [10] CASTREJÓN-GARCÍA, R., et al. The shadowgraph imaging technique and its modern application to fluid jets and drops. *Revista mexicana de física*. 2011. Vol. 57, pp. 266–275.



- [11] ČARNOGURSKÁ M., PŘÍHODA M., HAJKR Z., PYSZKO R. a TOMAN Z. THERMAL EFFECTS OF A HIGHPRESSURE SPRAY DESCALING PROCESS. *Materiali in tehnologije = Materials and technology / Institut za Kovinske Materiale in Tehnologije*. 2014. Vol. 48, No. 3, pp. 389–394.
- [12] DORAZIL, Eduard. *Nauka o materiálu II: Přednášky : Určeno pro posl. fak. strojní*. Učební texty vys. škol, Brno. 1987. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] ESPINOSA D., LANNOO G., et al. Innovative high temperature and mechanical descaling (HIDES). Luxembourg: Publications Office, 2013. ISBN 978-927-9332-296.
- [14] FARRUGIA, D., RICHARDSON, Andrew, LAN, Yong Jun. Advancement in Understanding of Descalability during High Pressure Descaling. *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications, 2014. pp. 29–36. DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.622-623.29
- [15] FOLDYNA, Josef et al. Effects of pulsating water jet impact on aluminium surface. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209, No. 20, pp. 6174–6180. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.06.004
- [16] FOLDYNA, Josef et al. Erosion of metals by pulsating water jet. *Technical Gazette (Tehnicki Vjesnik)*. 2012. Vol. 19, No. 2, pp. 381–386.
- [17] FRICK, Jürgen W. Optimisation of Nozzle Arrangements on Descaling Headers. In: *4th International Conference on Hydraulic Descaling*, London. 2003.
- [18] FRICK, Jürgen W. Enhanced Accuracy of Descaling Nozzle Arrangements With New, Complementary Measurement Methods. In: *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*, Vol. 2 (2014), pp. 2025–2028
- [19] HNÍZDIL, Milan a RAUDENSKÝ, Miroslav. Descaling by pulsating water jet. Thompson and Reuters. Tanger spol. s r.o. 2011. pp. 43–48. ISBN 978-80-87294-17-8.
- [20] HORSKÝ, J.; ONDROUŠKOVÁ, J.; MORAVEC, R.; BLAŽEK, K.; YIN, H. Analysis of Directly Measured Heat Transfer Coefficients During Special Experiments to Provide Better Understanding of Secondary Cooling During Continuous Casting Process. In: *2013 AISTech Conference Proceedings*. AIST Association for Iron & Steel Technology. Pittsburgh: AISTech 2012, 2013. pp. 1401–1409. ISBN: 978-1-935117-33-9. ISSN: 1551-6997.

- [21] HRABOVSKÝ, Jozef. *Kvantifikace mechanismů hydraulického odstranění okují*. Brno: VUT v Brně 2013. Dizertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [22] HŘIBOVÁ, V. *Vývoj inverzní sub-doménové metody pro výpočet okrajových podmínek vedení tepla*. Brno: VUT v Brně, Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [23] GAO, Wei. *Developments in high temperature corrosion and protection of materials*. Elsevier, University of Auckland, New Zealand. 2008.
- [24] GAO P. Study of Convective Heat Transfer Coefficient of High Pressure Water Descaling. *Applied Mechanics and Materials*. Vols 599–601, pp. 1976–1980, 2014. ISSN 1662-7482. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.599-601.1976.
- [25] GHOSH, Ahindra a CHATTERJEE, Amit. Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice. *Ironmaking and Steelmaking*. Prentice-Hall of India Pvt. Ltd, 2000. ISBN 978-81-20332-89-8.
- [26] CHANG, Yao Nan a WEI, Feng I. High temperature oxidation of low alloy steels. *Journal of materials science*. Vol. 24 (1989), pp. 14–22.
- [27] CHABIČOVSKÝ, M. a RAUDENSKÝ, M. Experimental Investigation of the Heat Transfer Coefficient. *Materiali in tehnologije*. 2013. Vol. 47, pp. 395–398. ISSN 1580-2949.
- [28] CHABIČOVSKÝ, M., RAUDENSKÝ, M. a HNÍZDIL, M. Influence of water temperature on heat transfer coefficient in spray cooling of steel surfaces. In: *Engineering mechanics 2012. Engineering mechanics*. 2012. pp. 499–505. ISBN: 978-80-86246-40-6
- [29] CHEN, R. Y., YEUN, W. Y. D. Review of the high-temperature oxidation of iron and carbon steels in air or oxygen. *Oxidation of metals*. 2003. Vol. 59, No. 5–6, pp. 433–468.
- [30] CHOI J. W, CHOI J.W. Convective Heat Transfer Coefficient for High Pressure Water Jet. *ISIJ International*. 2002, Vol. 42, Issue 3, pp. 283–289. DOI: 10.2355/isijinternational.42.283.
- [31] KIM, Sang-Heon, KIM, Hansoo a KIM, Nack J. Brittle intermetallic compound makes ultrastrong low-density steel with large ductility. *Nature*. 2015. Vol. 518, pp. 77–79.

- [32] KLIMEŠ, Lubomír. *Optimalizace parametrů sekundárního chlazení plynulého odlévání oceli*. Brno: VUT v Brně 2015. Dizertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [33] KOBLÍŽEK, Vilém. *E-learningová podpora výuky laboratorního předmětu X13MTV: Materiály a technologie výkonové elektrotechniky* [online]. [vid. 18. 8. 2015]. Dostupné z: <http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV.htm>.
- [34] KOMÍNEK, Jan a POHANKA, Michal. Estimation of the Number of Forward Time Steps for the Sequential Beck Approach Used for Solving Inverse Heat Conduction Problems. In: *22nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATERIALS AND TECHNOLOGY*. Ljubljana, Slovenia: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11. 2014. pp. 122–122. ISBN: 978-961-92518-7-4.
- [35] KOTRBÁČEK P., HORSKÝ J., RAUDENSKÝ M. a POHANKA M. Influence of parameters of hydraulic descaling on temperature losses and surface quality of rolled material. *Steel Grips, Journal of steel and related materials*. Vol. 2004, No. 2, 2004, pp. 367–370.
- [36] KRZYZANOWSKI, M. a BEYNON, J. H. Measurement of oxide properties for numerical evaluation of their failure under hot rolling conditions. *Journal of materials processing technology*. 2002. Vol. 125, pp. 398–404.
- [37] KRZYZANOWSKI, M. a BEYNON, J. H. Modelling the boundary conditions for thermo-mechanical processing-oxide scale behaviour and composition effects. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2000. Vol. 8, pp. 927–945.
- [38] KVAPIL, Jiří, HRABOVSKÝ, Josef a POHANKA, Michal. Water chamber geometry and stabilizer construction effect on water pressure distribution of high pressure descaling nozzles. In: *EPJ Web of Conferences*, 2012. Vol. 25 (2012), No. 4.
- [39] *Laboratoř přenosu tepla a proudění, webová stránka* [online]. [vid. 18.8.2015] Dostupné z: <http://www.heatlab.cz/>.
- [40] LEE, Dong-Won, et al. Study on the Reduction of Forging Oxide Scale using Hydrogen. *Journal of Korean Powder Metallurgy Institute*. 2013. Vol. 20, pp. 174–179.

- [41] LIU, Yayu, et al. Development of impact test system for waterjet descaling nozzles with LabVIEW. In: *Web Information Systems and Mining (WISM), 2010 International Conference on. IEEE*. China, Sanya, 2010. Vol. 1, pp. 3–7.
- [42] LOUHENKILPI, S. *Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes*. Chapter Continuous casting of steel. Elsevier, 2014, pp. 373–434. ISBN 978-0-08-096988-6.
- [43] MA, Fei, YANG, Nan, LIU, Ya Yu. Design of high-pressure waterjet descaling nozzles testing system with LabVIEW. *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publications, 2011. pp. 333–337.
- [44] MA, Fei, LI, Yong, SONG, Zhi Ming. Jet performance testing of high-pressure waterjet descaling nozzles. *Advanced Materials Research*. 2011. Vols 314–316 (2011), pp. 2408–2413. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.314-316.2408
- [45] MARSTON, H. F. Hydraulic De-scaling in Rolling mills. In: *Proceedings of 1st Int. Conf. on Hydraulic Descaling in Rolling Mills*. London, Painters Hall, 1995. pp. 1–10.
- [46] MORREL, R. *Handbook of Properties of Technical and Engineering Ceramics*. Her Majesty's Stationery Office, London 1987.
- [47] *New Zealand Steel webpage* [online]. [vid. 18.8.2015]. Dostupné z: <http://www.nzsteel.co.nz/new-zealand-steel/the-story-of-steel/the-steel-making-process/hot-rolling-mill/>
- [48] OCHIAI, S., Improvement of the oxidation-proof property and scale structure of Mo<sub>3</sub>Si intermetallic alloy through the addition of chromium and aluminium elements. In: *Intermetallics*. 2006. No. 14, pp. 1351–1357.
- [49] ONDRUŠKOVÁ, Jana. *Rozvoj inverzních úloh vedení tepla řešených s využitím optimalizačních postupů a vysokého stupně paralelizace*. Brno: VUT v Brně 2015. Dizertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [50] ONDROUŠKOVÁ, Jana, KOMÍNEK, Jan a POHANKA, Michal. Computing Cooling Intensity from Descaling Experiments. In: *Steelsim 2013*. 2013. pp. 19–19. ISBN: 978-80-260-3912-9.
- [51] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L. *Nauka o materiálu III: Přehled vývoje materiálů; Teorie hutnických pochodů; Obecné hutnictví, ročník 1*. Nakladatelství Československé akademie věd, 1962.

- [52] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L. *Nauka o materiálu III: Výroba železa, oceli a ne-železných kovů; nekovové materiály, ročník 2*. Nakladatelství Československé akademie věd, 1962.
- [53] POHANKA, Michal. *Inverzní úlohy mechaniky s vazbou na technický experiment*. Brno: VUT v Brně 2006. Dizertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [54] POHANKA, Michal. Limitation of thermal inverse algorithm and boundary conditions reconstruction for very fast changes on boundary. In: *IM2007*. Praha, 2007. pp. 229–230. ISBN: 978-80-87012-06-2.
- [55] RAHMEL, A., TOBOLSKI, J. Einfluss von wasserdampf und kohlendioxid auf die oxydation von eisen in sauerstoff bei hohen temperaturen. *Corrosion science*, pp. 333–340
- [56] RAUDENSKÝ, Miroslav. *Hydraulické odstranění okují = Hydraulic descaling*. Teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení. Brno: VUTUM, 2008. ISBN 978-80-214-3621-3.
- [57] RAUDENSKÝ, Miroslav et al. Hydraulic descaling improvement, findings of jet structure on water hammer effect. *Revue de Métallurgie*. 2007. Vol. 104, pp. 84–90. ISSN 0035-1563 (print edition)
- [58] RAYNAUD, M., BECK, J. V. Methodology for comparison of inverse heat conduction methods. *Journal of heat transfer*. 1988. Vol. 110, pp. 30–37.
- [59] RIAZ, S., BUGDOL, M., FARRUGIA, D. et al. *Oxidation management in hot rolling processes (Oxmapro)* Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. ISBN 978-92-79-29157-9. DOI: 10.2777/79929.
- [60] ROBERTSON, J., MANNING, M. I. Limits to adherence of oxide scales. *Materials Science and Technology*, 1990. Vol. 6, pp. 81–92.
- [61] SCHURMANN Stefan. Measurement and mathematical approximation of the impact of descaling nozzles In: *Third International Conference on Hydraulic Descaling*. London, 2000.
- [62] SILK, N. J. The practical aspects of hydraulic de-scaling. *Steel Times International*. 2001. Vol. 25, pp. 38–41
- [63] SONG, E. J., SUH, D. W., BHADESHIA, H. K. D. H. Oxidation of silicon containing steel. *Ironmaking & Steelmaking*, 2012, Vol. 39, pp. 599–604.

- [64] SULTAN, Abdelrahman. *High Temperature Corrosion of Steels Used in Petroleum Refinery Heaters*. 2005. PhD Thesis. MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY.
- [65] TAKEDA, M., ONISHI, T. Oxidation behavior and scale properties on the Si containing steels. In: *Materials Science Forum, High-Temperature Oxidation and Corosion*. 2005. pp. 477–488.
- [66] VAVŘEČKA, Lukáš. *Vliv parametrů vysokotlakého ostříku na kvalitu odkujení*. Brno: VUT v Brně 2011. Dizertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [67] WADA, Tadayoshi, UEDA, Masao a OSHIMI, Masakazu. Impact Pressure of Water in Hydraulic Descaling during Hot Strip Mill Rolling, *ISIJ International*. Vol. 77 (1991), No. 9, pp. 1450–1457.
- [68] WOLF, M. M. Scale formation and descaling in continuous casting and hot rolling, *Iron & steelmaker*. 2000. Vol. 7 No. 6.
- [69] *World Steel in Figures [online]*. World Steel Association, 2018. ISBN 978-2-930069-89-0. [vid. 13.1.2019] Dostupné z: <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:f9359dff-9546-4d6b-bed0-996201185b12/World+Steel+in+Figures+2018.pdf>.



# Vlastní publikace vztahující se k dizertaci

- [A1] VOTAVOVÁ, Helena a POHANKA, Michal. Study of Water Jets Collision of High Pressure Flat Jet Nozzles for Hydraulic Descaling. In: *ENGINEERING MECHANICS 2015, 21st International Conference Engineering Mechanics 2015*. Svratka: Institute of Theoretical and Applied Mechanics, 2015. pp. 354–355. ISBN: 978-80-86246-42-0. ISSN: 1805-8248.
- [A2] VOTAVOVÁ, Helena, POHANKA, Michal a BULEJKO, Pavel. Cooling homogeneity measurement during hydraulic descaling in spray overlapping area. In: *METAL 2015 24th International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger Ltd Ostrava, 2015. pp. 1–6. ISBN: 978-80-87294-58-1.
- [A3] POHANKA, Michal a VOTAVOVÁ, Helena. Overcooling in overlapping areas during hydraulic descaling. In: *Book of abstracts. 23rd International Conference on Materials and Technology*. Ljubljana: Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana, Lepi pot 11, 2015. pp. 199–199. ISBN: 978-961-92518-8-1.
- [A4] ŠČUČKA, Jiří, ZELENÁK, Michal, FOLDYNA, Josef, LEHOČKÁ, Dominika a VOTAVOVÁ, Helena. Visualisation and quantitative analysis of flat continuous water jet structure. In: *Vodní Paprsek 2015 – Výzkum, vývoj, aplikace, Water Jet 2015 – Research, Development, Application*. Prešov: Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., 2015. pp. 195–205. ISBN: 978-80-86407-56-2.
- [A5] VOTAVOVÁ, Helena a POHANKA, Michal. Study of Overlapping Area of High Pressure Flat Water Jets Used for Hydraulic Descaling. In: *Ph.D. Workshop 2015 Proceedings*. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TU Ostrava, 2015. pp. 24–24. ISBN: 978-80-86407-62-3.
- [A6] VOTAVOVÁ, Helena a POHANKA, Michal. Study of Water Jet Collision of High Pressure Flat Jet Nozzles for Hydraulic Descaling. *Engineering Mechanics 2015. Applied Mechanics and Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications, 2016. pp. 152–158. ISBN: 978-3-03835-700-1. ISSN: 1660-9336.



- [A7] VOTAVOVÁ, Helena a POHANKA, Michal. Effect of stabilizer length on the performance of high pressure, descaling nozzles. In: *METAL 2016, 25rd International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger Ltd Ostrava, 2016. pp. 261–266. ISBN: 978-80-87294-67-3.
- [A8] POHANKA, Michal a VOTAVOVÁ, Helena. Overcooling in overlap areas during hydraulic Descaling. *Materiali in tehnologije*. 2016. Vol. 50, No. 4, pp. 575–578. ISSN: 1580-2949. DOI: 10.17222/mit.2015.164
- [A9] VOTAVOVÁ, Helena a POHANKA, Michal. Effect of the speed of feedstock on heat transfer coefficient during descaling in hot rolling. In: *METAL 2017, 26rd International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger Ltd Ostrava, 2017. s. 261–266. ISBN: 978-80-87294-73-4.
- [A10] POHANKA, Michal, VOTAVOVÁ, Helena, RAUDENSKÝ, Miroslav, HWANG, J. Y., YOU, J. W., LEE, S. H. The effect of water temperature on cooling during high pressure water descaling. *Thermal Science*. 2017. No. 00, pp. 163–173. ISSN: 0354-9836. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI160209163P>
- [A11] VOTAVOVÁ, Helena a POHANKA, Michal. The cooling process in spray overlap during hydraulic descaling. In: *METAL 2018, 27rd International Conference on Metallurgy and Materials*. Ostrava: Tanger Ltd Ostrava, 2018. pp. 1–6. ISBN: 978-80-87294-83-3.
- [A12] RAUDENSKÝ, Miroslav, POHANKA, Michal, VOTAVOVÁ, Helena, ŘÍHA, Zdeněk, ZELENÁK, Michal. Latest development of hydraulic descaling nozzles. In: *ICLASS 2018: The 14th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems*. Chicago, USA, 2018. pp. 1–5.
- [A13] POHANKA, Michal, HNÍZDIL, Milan, KOTRBÁČEK, Petr, VOTAVOVÁ, Helena. Hydraulic descaling of wire coils during pickling program. In: *EUROPEAN OXIDE SCALE CONFERENCE (OXI 2018)*. London, UK, 2018. s. 45-48.

## Ostatní vlastní publikace

- [B1] CHABIČOVSKÝ, Martin, VOTAVOVÁ, Helena, HORSKÝ, Jaroslav, TURONĚ Rostislav a ŠIMEČEK, Pavel. Heat treatment of tubes. In: *METAL 2015, 24rd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*. Ostrava: Tanger Ltd., 2015. pp. 1–6. ISBN: 978-80-87294-58-1.



# Seznam symbolů, veličin a zkratk

Zkratka	Jednotka	Popis
$\alpha$	[°]	úhel rozstříku
$\alpha_{nom}$	[°]	nominální úhel rozstříku
$\theta$	[°]	úhel hloubky paprsku
$\beta$	[°]	úhel náklonu trysky
$\gamma$	[°]	úhel natočení trysky
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	hustota
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	plocha stopy trysky
$h$	[W/m <sup>2</sup> K]	součinitel přestupu tepla
$h_p$	[W/m <sup>2</sup> K]	průměrný součinitel přestupu tepla
$E$	[mm]	rozteč trysek
$k(T)$		parametr růstu okují
$l_{exp}$	[mm]	experimentálně změřená šířka stopy trysky
$p$	[Pa]	tlak
$p_{ref}$	[Pa]	referenční tlak
$Q$	[l/min]	průtok vody za minutu
$Q_{ref}$	[l/min]	referenční průtok vody za minutu
$T$	[K]	teplota
$T_{tav}$	[K]	teplota tavení
$t$	[s]	čas
$v$	[m/s]	rychlost
$v_0$	[m/s]	rychlost výtoku v ústí trysky
$y$	[mm]	výška trysky nad ostříkávaným povrchem
$z$	[mm]	výška okují
$z_p$	[mm]	průměrná výška okují



# Seznam obrázků

1	Historie produkce oceli s vyznačeným podílem Číny [69] . . . . .	3
1.1	Válcování plechů za tepla [47] . . . . .	6
1.2	Chemicky vznik okují [55] . . . . .	7
1.3	Vznik okují v závislosti na teplotě a procentu kyslíku [40] . . . . .	8
1.4	Podíl tloušťky vrstvy okují v závislosti na teplotě dle [4] . . . . .	9
1.5	Beketova řada kovů . . . . .	10
1.6	Závislost parametru růstu okují $k(T)$ na teplotě [4] . . . . .	13
2.1	Fyzikální principy odstranění okují [56] . . . . .	17
2.2	Konstrukce trysky [17] . . . . .	18
2.3	Schéma nastavení trysek . . . . .	19
2.4	Schéma úhlu – Lechler [61] . . . . .	20
2.5	Schéma stopy trysky . . . . .	22
3.1	Metoda prosvícení laserem . . . . .	25
3.2	Stínografická metoda . . . . .	25
3.3	Princip pořizování fotografií stínografickou metodou [10] . . . . .	26
3.4	Princip zpracování fotografií stínografickou metodou dle článku [10] . . . . .	26
3.5	Princip pořizování fotografií stínografickou metodou [A4] . . . . .	27
3.6	Paprsek focený prosvícením z laseru, identifikace velkých shluků vody a identifikace kapek v obraze [A4] . . . . .	27
3.7	Měřicí aparatura pro měření impaktního tlaku . . . . .	28
3.8	Rozdíl ve velikosti senzoru vůči hloubce paprsku a) průměr senzoru 1 mm, b) průměr senzoru 0,2 mm . . . . .	28
3.9	Rozdíl v měřených hodnotách impaktního tlaku pro identickou konfiguraci při pohledu z boku a) průměr senzoru 1 mm, b) průměr senzoru 0,2 mm . . . . .	29
3.10	Měření pomocí tzv. pinu na stříšce [43] . . . . .	29
3.11	Ukázka z měření vybrané konfigurace trysek pro dizertační práci . . . . .	30
3.12	3D model hliníkové destičky s erozí od páru vodních paprsků [A1] . . . . .	30
3.13	Stopa erozí od páru vodních paprsků s naznačenou oblastí překryvu [13] . . . . .	31

3.14	Linear – experimentální zařízení určené pro měření součinitele přestupu tepla a měření homogenity chlazení . . . . .	32
3.15	Typický průběh součinitele přestupu tepla v závislosti na poloze vzorku . . . . .	33
3.16	Měření tloušťky okují po testu kvality odkujení [39] . . . . .	36
3.17	Kvalita odkujení v závislosti na rychlosti a impaktním tlaku [56] . . . . .	37
3.18	Kvalita odkujení v závislosti na rychlosti pro ocel s příměsí křemíku [56] . . . . .	37
4.1	Průběh teploty vzorku při měření . . . . .	42
4.2	Fotografie vrstvy oxidů v mikroskopu. Zvětšení 10× . . . . .	43
4.3	Identifikace vrstvy oxidů pomocí obrazové analýzy. Zvětšení 10× . . . . .	43
4.4	Krabicový graf tloušťky vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 900 °C . . . . .	44
4.5	Graf regresní funkce $-11,338 + 12,826\sqrt{t}$ pro teplotu 900 °C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%), $R^2 = 0,885$ . . . . .	44
4.6	Krabicový graf tloušťky vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1050°C . . . . .	45
4.7	Graf regresní funkce $-164,17 + 56,188\sqrt{t}$ pro teplotu 1050°C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%), $R^2 = 0,9822$ . . . . .	45
4.8	Ilustrační obrázek struktury okují pro čas oxidace 30 minut při teplotě 1200 °C . . . . .	46
4.9	Krabicový graf tloušťky vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1200°C . . . . .	46
4.10	Graf regresní funkce $-183,93 + 112,96\sqrt{t}$ pro teplotu 1200 °C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%), $R^2 = 0,9534$ . . . . .	47
4.11	Krabicový graf tloušťky dolní vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1200 °C . . . . .	47
4.12	Graf regresní funkce $-159+46,432\sqrt{t}$ pro spodní vrstvu okují u oceli a teplotu 1200°C s naznačeným predikčním a konfidenčním intervalem (95%), $R^2 = 0,9169$ . . . . .	48
4.13	Krabicový graf tloušťky horní vrstvy okují v závislosti na době oxidace pro teplotu 1200°C . . . . .	48
4.14	Graf regresních funkcí pro všechny měřené teploty s naznačeným konfidenčním intervalem (95%) . . . . .	49
4.15	Krabicový graf tloušťky vrstvy okují oceli HDT580X po 120 minutách oxidace při teplotě 1200°C . . . . .	51
4.16	Stabilizátor pro Trysku 2 . . . . .	52
4.17	Stabilizátor pro Trysku 4 . . . . .	53
4.18	Schéma nastavení pro Trysku 2 (vlevo) a 4 (vpravo) . . . . .	54

4.19	Impaktní profil Trysky 2 při použití dvou různých stabilizátorů . . . .	54
4.20	Impaktní profil Trysky 4 při použití dvou různých stabilizátorů . . . .	55
4.21	Postup při zpracování obrazu: původní obraz, binární obraz, obraz s barevně rozlišenými vodními celky . . . . .	58
4.22	Závislost pozorovaného procenta vodních celků na výšce trysky u Trysky 8 . . . . .	59
4.23	Závislost průměrného počtu rozlišitelných celků v 1 milimetru výšky obrazu na výšce trysky u Trysky 8 . . . . .	59
4.24	Složené stínografické fotografie vodního paprsku Trysky 8 od výšky 40 mm do 222 mm při tlaku 20 MPa; fotografie rozdělena na poloviny z důvodu velké délky . . . . .	60
4.25	Impaktní tlak Trysky 4 při pracovním tlaku 20 MPa v závislosti na výšce trysky . . . . .	62
4.26	Graf závislosti průměrného součinitele přestupu tepla na výšce trysky při tlaku 20 MPa (resp. 21 MPa) . . . . .	64
4.27	Graf závislosti průměrného součinitele přestupu tepla na průtoku vody na 1 milimetr šířky stopy vodního paprsku . . . . .	65
4.28	Graf regresní závislosti průměrného součinitele přestupu tepla v zá- vislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky . . . . .	66
4.29	Standardní označení konfigurace trysek . . . . .	68
4.30	Procento šířky ostříkovaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku 25° (vlevo) a 40° (vpravo) . . . . .	71
4.31	Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek při nulovém přesazení trysek . . . . .	73
4.32	Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek při kladném přesazení trysek o 10 mm . . . . .	74
4.33	Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek při záporném přesá- zení trysek o 10 mm . . . . .	74
4.34	Profil impaktního tlaku v překryvu stop trysek pro experimenty mě- řené při jednotném pracovním tlaku 20 MPa . . . . .	74
4.35	Regresní funkce washoutu v závislosti na přesazení a odhad geomet- rického modelu . . . . .	75
4.36	Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající expe- rimentu I405 na oceli 54SiCr6 při době oxidace 25 minut . . . . .	76
4.37	Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající expe- rimentu I405 na oceli 54SiCr6 při době oxidace 120 minut . . . . .	77
4.38	Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající expe- rimentu I405 (s pracovním tlakem 30 MPa) na oceli S235JR při době oxidace 25 minut . . . . .	77



4.39	Výsledné měření kvality odkujení pro konfiguraci odpovídající experimentu I406 na oceli HDT580X při době oxidace 120 minut . . . . .	78
4.40	Snímek z mikroskopu na rozhraní mezi lépe a hůře odkujenou částí oceli HDT580X při experimentu Q406 . . . . .	78
4.41	Krabicový graf tloušťky vrstvy okují oceli HDT580X po 120 minutách oxidace při teplotě 1200°C při experimentu Q406 . . . . .	79
4.42	Profil impaktního tlaku experimentů I501, I501L a I501R s úhlem natočení 0° . . . . .	82
4.43	Profil impaktního tlaku experimentů I501a, I501aL a I501aR s opotřebovaným párem Trysek 5a a úhlem natočení 0° . . . . .	83
4.44	Porovnání profilu impaktního tlaku u nového a opotřebovaného páru . . . . .	83
4.45	Porovnání impaktního tlaku u nového a opotřebovaného páru . . . . .	84
4.46	Vliv rozteče 43 mm (nahore), 46 mm (uprostřed) a 49 mm (dole) na rozložení impaktního tlaku . . . . .	84
4.47	Vliv rozteče na rozložení profilu impaktního tlaku pro tlak 40 MPa . . . . .	84
4.48	Vliv rozteče na rozložení profilu impaktního tlaku pro tlak 10,5 MPa . . . . .	85
4.49	Stínografická fotografie srážky plochých vodních paprsků Trysky 4 . . . . .	85
4.50	Vliv úhlu natočení na rozložení impaktního tlaku. Odshora 0°; 0,4°; 1,25° a 2,5° . . . . .	86
4.51	Vliv úhlu natočení na rozložení profilu impaktního tlaku . . . . .	86
4.52	Profil impaktního tlaku experimentu I509 (pravá a levá stopa trysek označena R, resp. L) s úhlem natočení 15° . . . . .	87
4.53	Výsledky experimentů E501 (nahore), E510 (uprostřed) a E509 (dole) . . . . .	88
4.54	Profil eroze v oblasti překryvu u experimentu E501 . . . . .	89
4.55	Profil eroze v oblasti překryvu u experimentů E509 a E510 . . . . .	89
4.56	Porovnání homogenity chlazení u experimentů T501 a T509; v horní části grafu jsou naznačeny stopy příslušných konfigurací . . . . .	90
4.57	Průběh teploty měřené termočlánkem (plná čára) a vypočítané teploty na povrchu (přerušovaná čára) v závislosti na vzájemné pozici vzorku a pozici stopy 1. trysky pro experimenty H501, H503, H506 a H509 . . . . .	92
4.58	Průběh součinitele přestupu tepla v závislosti na vzájemné pozici vzorku a pozici stopy 1. trysky pro experimenty H501, H503, H506 a H509 . . . . .	92
4.59	Graf průměrné hodnoty součinitele přestupu tepla v závislosti na úhlu natočení a rozteči . . . . .	93
4.60	Výsledek experimentu Q501a na oceli křemíkové 54SiCr6 při teplotě oxidace nad 1173 °C při úhlu natočení 0° . . . . .	94
4.61	Výsledek experimentu Q509a na oceli křemíkové 54SiCr6 při teplotě oxidace pod 1173 °C při úhlu natočení 15° . . . . .	95

4.62	Výsledek experimentu Q509b na oceli křemíkové 54SiCr6 při teplotě oxidace nad 1 173 °C při úhlu natočení 15° . . . . .	95
4.63	Výsledek experimentu Q511 na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C při úhlu natočení 0° . . . . .	96
4.64	Výsledek experimentu Q512 na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C při úhlu natočení 2,5° . . . . .	96
4.65	Výsledek experimentu Q513 na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C při úhlu natočení 15° . . . . .	97
4.66	Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 5 .	103
4.67	Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 5 . . . . .	103
4.68	Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 9 .	104
4.69	Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 9 . . . . .	105
4.70	Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na rychlosti .	105
4.71	Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky při konstantní rychlosti posuvu vzorku 2 m/s [10mm] . . . . .	107
4.72	Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky při konstantní rychlosti posuvu vzorku 1 m/s . . . . .	107
4.73	Graf průměrného součinitele přestupu tepla v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky při konstantní rychlosti posuvu vzorku 0,5 m/s . . . . .	108
4.74	Graf kontur regresní plochy určující závislost průměrného součinitele přestupu tepla $\left[ \frac{W}{m^2K} \right]$ v závislosti na průtoku vody na 1 mm šířky stopy trysky a rychlosti posuvu . . . . .	109
A.1	Experiment při času oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	142
A.2	Experiment při času oxidace 60 minut (vlevo) a 120 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	142
A.3	Experiment při času oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	143
A.4	Experiment při času oxidace 45 minut (vlevo), 60 minut (uprostřed) a 120 minut (vpravo). Měřítka je u všech snímků stejné. . . . .	143
A.5	Experiment při času oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	144

A.6	Experiment při čase oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	145
A.7	Experiment při čase oxidace 45 minut (vlevo) a 60 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	145
A.8	Experiment při čase oxidace 30 minut (vlevo), 45 minut (uprostřed) a 60 minut (vpravo). Měřítka je u všech snímků stejné. . . . .	146
A.9	Vrůstání u vzorku při čase oxidace 15 minut. . . . .	146
A.10	Vrůstání u vzorku při čase oxidace 30 minut. . . . .	146
A.11	Vrůstání u vzorku při čase oxidace 45 minut (vlevo) a 60 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	147
A.12	Vrstva okují na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C a čase 120 min. Zkoumáno bylo místo s nižší (nahore) a vyšší (dole) vrstvou okují. Měřítka je u obou snímků stejné. . . . .	148
D.1	Procento šířky ostříkávaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku 25° (vlevo) a 30° (vpravo) stupňů . . . . .	163
D.2	Procento šířky ostříkávaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku 35° (vlevo) a 40° (vpravo) stupňů . . . . .	164
D.3	Procento šířky ostříkávaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku 45° (vlevo) a 50° (vpravo) stupňů . . . . .	164
E.1	Podrobný výsledek experimentu H501. . . . .	179
E.2	Podrobný výsledek experimentu H503. . . . .	179
E.3	Podrobný výsledek experimentu H506. . . . .	179
E.4	Podrobný výsledek experimentu H509. . . . .	179
F.1	Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 1. . . . .	187
F.2	Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 1. . . . .	187
F.3	Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 2. . . . .	187
F.4	Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 2. . . . .	188
F.5	Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 6. . . . .	188
F.6	Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 6. . . . .	188
F.7	Vývoj teploty v závislosti na pozici vzorku pro jednotnou rychlost 0,5 m/s. . . . .	189
F.8	Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici vzorku pro jednotnou rychlost 0,5 m/s. . . . .	189

# Seznam tabulek

1.1	Hmotnostní poměr kyslíku v okujích . . . . .	8
1.2	Vlastnosti okují jako homogenní vrstvy . . . . .	14
1.3	Vlastnosti okují dle typu oxidu . . . . .	15
4.1	Vysvětlení názvosloví . . . . .	39
4.2	Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody . . . . .	40
4.3	Chemické složení zkoumané oceli 54SiCr6 [6] [9] . . . . .	41
4.4	Plán měření struktury oxidů testované oceli 54SiCr6 . . . . .	41
4.5	Chemické složení zkoumané oceli S235JR [7] [9] . . . . .	50
4.6	Chemické složení zkoumané oceli HDT580X [9] . . . . .	50
4.7	Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody . . . . .	52
4.8	Seznam experimentů I2XX a jejich výsledků . . . . .	53
4.9	Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody . . . . .	56
4.10	Seznam vybraných stínografických fotografií F3XX a jejich výsledků . . . . .	58
4.11	Seznam experimentů I3XX a jejich výsledků (1. část) . . . . .	61
4.12	Seznam experimentů I3XX a jejich výsledků (2. část) . . . . .	62
4.13	Seznam experimentů H3XX a jejich výsledků . . . . .	63
4.14	Konstrukční parametry Trysky 4 . . . . .	72
4.15	Seznam experimentů I4XX a jejich výsledků . . . . .	72
4.16	Seznam experimentů Q4XX . . . . .	76
4.17	Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody . . . . .	80
4.18	Seznam experimentů I5XX a jejich výsledků . . . . .	81
4.19	Seznam experimentů E5XX . . . . .	87
4.20	Seznam experimentů T5XX . . . . .	90
4.21	Seznam experimentů H5XX a jejich výsledků . . . . .	91
4.22	Seznam experimentů Q5XX . . . . .	93
4.23	Typy použitých trysek seřazené dle průtoku vody . . . . .	100
4.24	Seznam experimentů I6XX a jejich výsledků . . . . .	101
4.25	Seznam experimentů H6XX a jejich výsledků . . . . .	102



# Seznam příloh

A	Nalezení vhodného typu oceli a parametrů oxidace pro prokazatelná měření kvality odkujení	141
B	Experimentální určení vlivu stabilizátoru trysky na rozložení impaktního tlaku vodního paprsku	149
C	Obrazová analýza struktury vodního paprsku	155
D	Experimentální studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků	163
E	Nalezení optimálních úhlů natočení a roztečí trysek	175
F	Experimentální studium vlivu rychlosti posuvu ve směru válcování na součinitel přestupu tepla	181



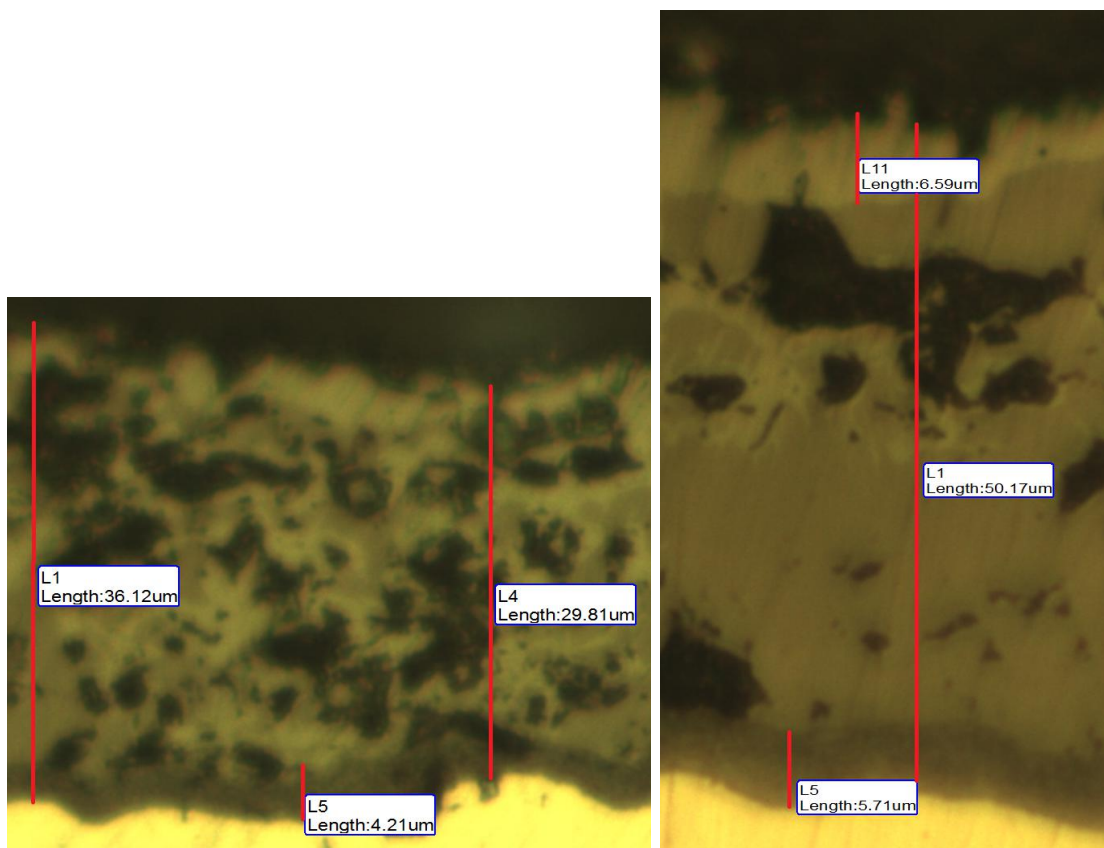
# PŘÍLOHA **A**

Nalezení vhodného typu oceli a  
parametrů oxidace pro  
prokazatelná měření kvality  
odkujení

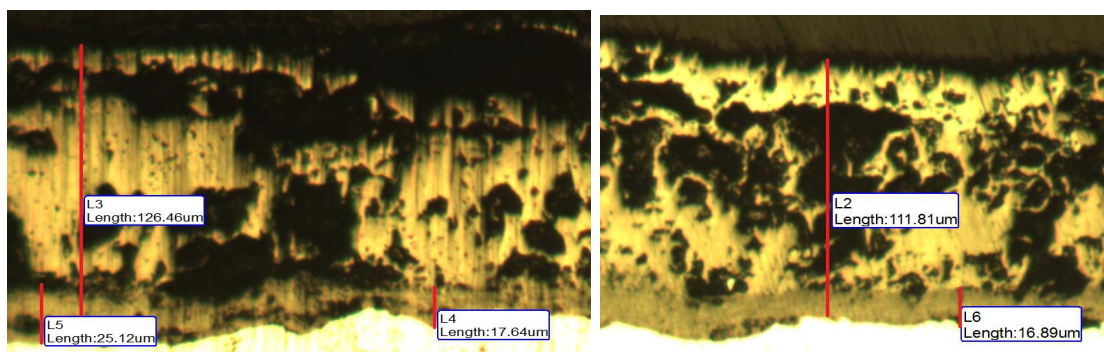


## A.1 | Ocel 54SiCr6

### A.1.1 | Struktura okují při teplotě oxidace 900 °C

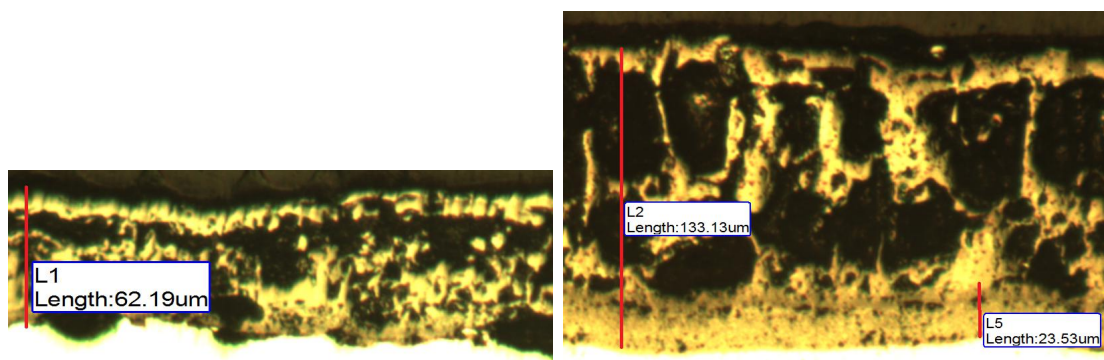


Obr. A.1: Experiment při čase oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejná.

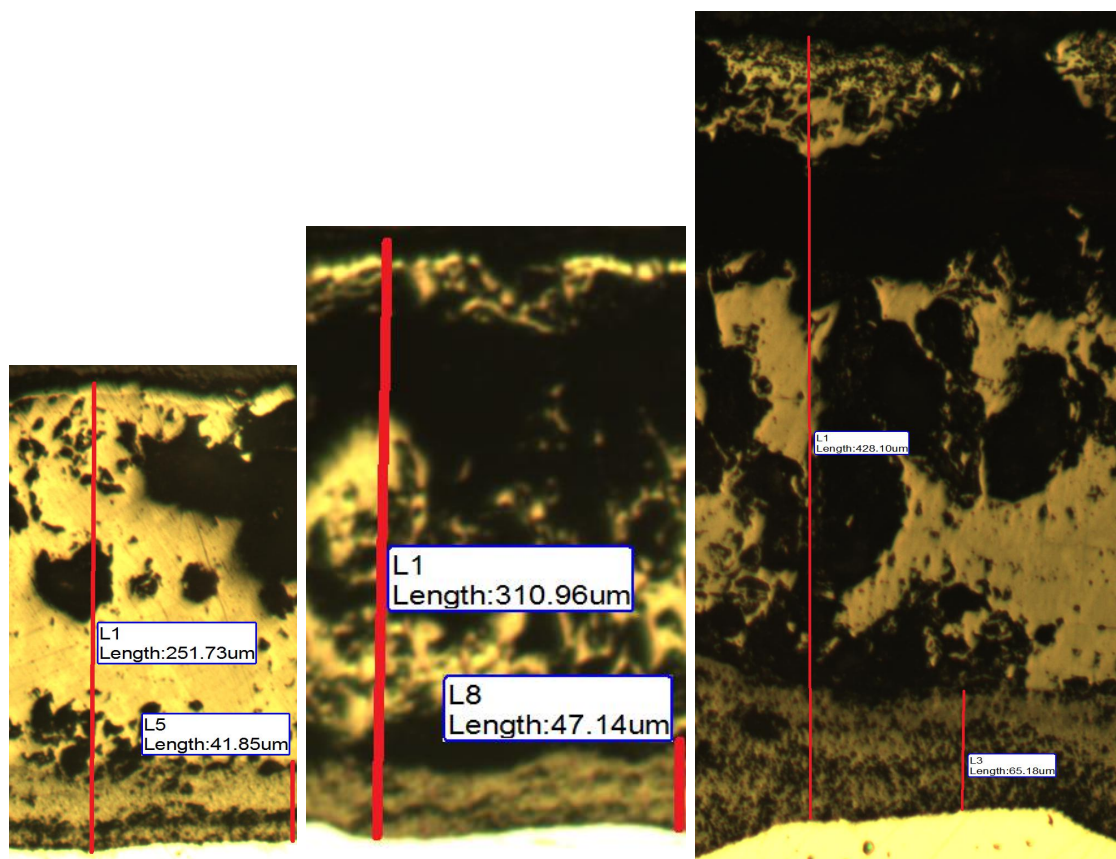


Obr. A.2: Experiment při čase oxidace 60 minut (vlevo) a 120 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejná.

### A.1.2 | Struktura okují při teplotě oxidace 1 050 °C



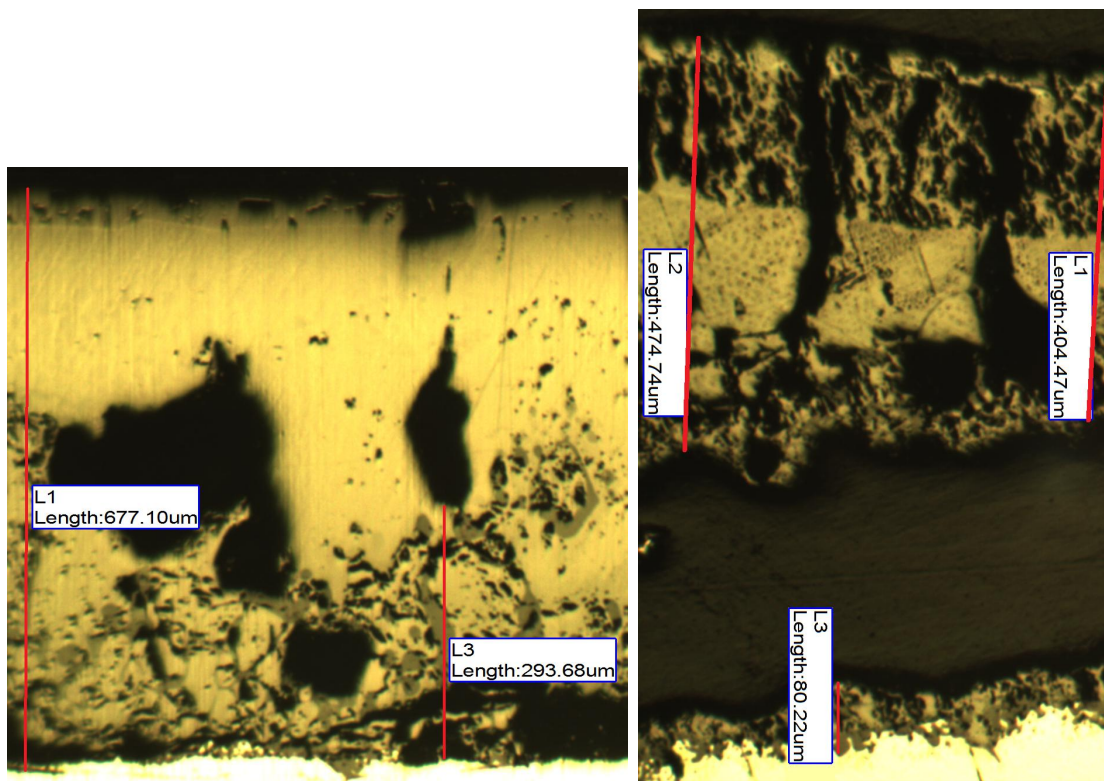
Obr. A.3: Experiment při času oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné.



Obr. A.4: Experiment při času oxidace 45 minut (vlevo), 60 minut (uprostřed) a 120 minut (vpravo). Měřítka je u všech snímků stejné.

### A.1.3 | Struktura okují při teplotě oxidace 1 200 °C

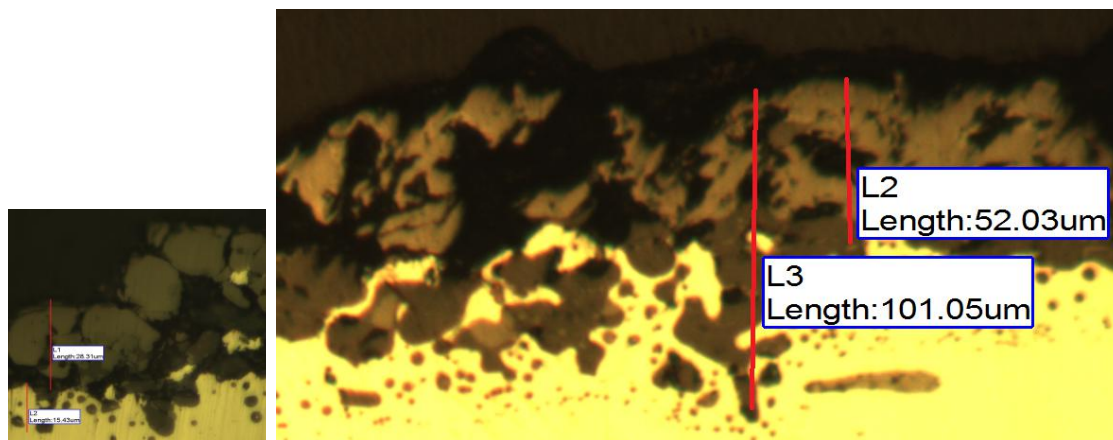
Fotografie celé výšky vrstvy



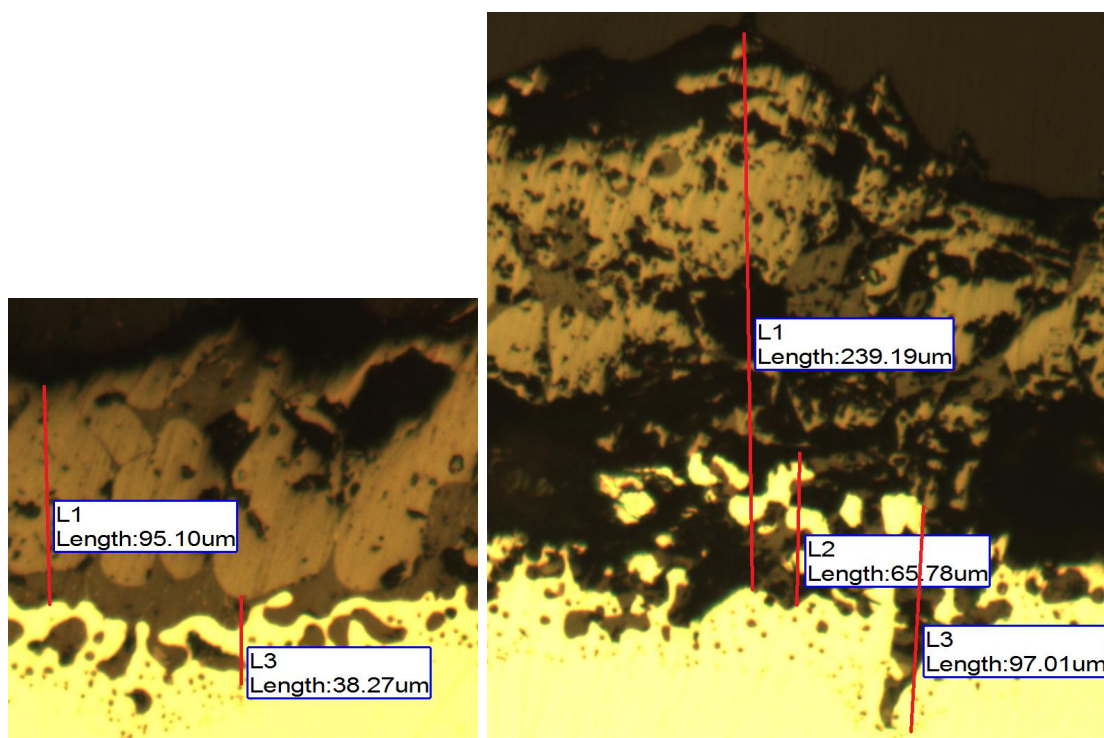
Obr. A.5: Experiment při čase oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejné.



### Fotografie spodní vrstvy

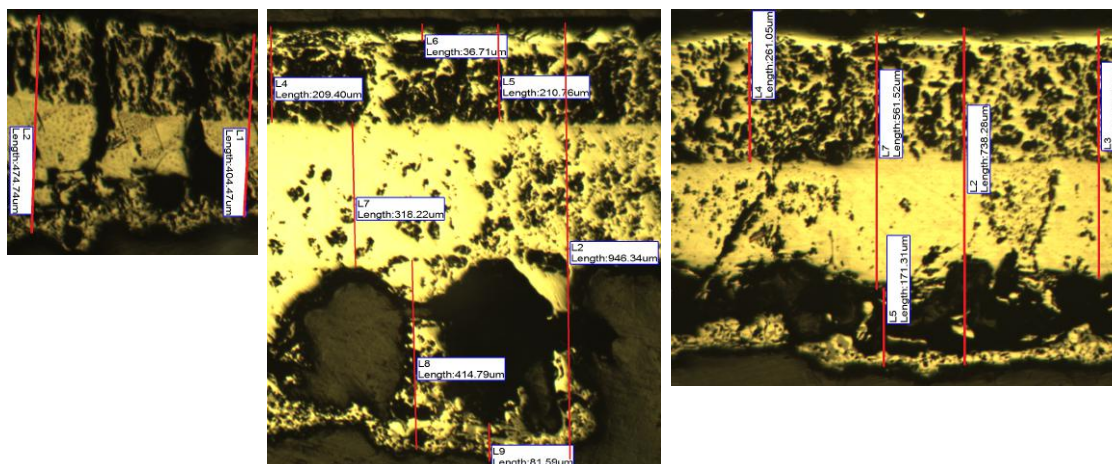


Obr. A.6: Experiment při čase oxidace 15 minut (vlevo) a 30 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejná.



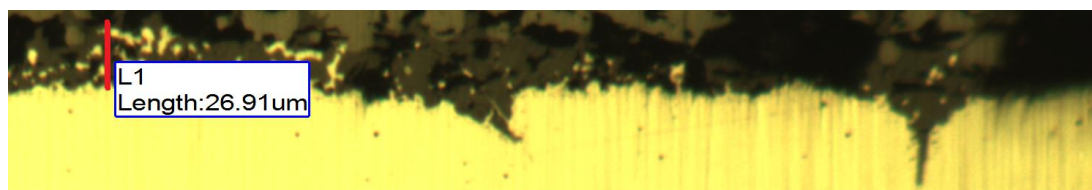
Obr. A.7: Experiment při čase oxidace 45 minut (vlevo) a 60 minut (vpravo). Měřítka je u obou snímků stejná.

## Fotografie horní vrstvy

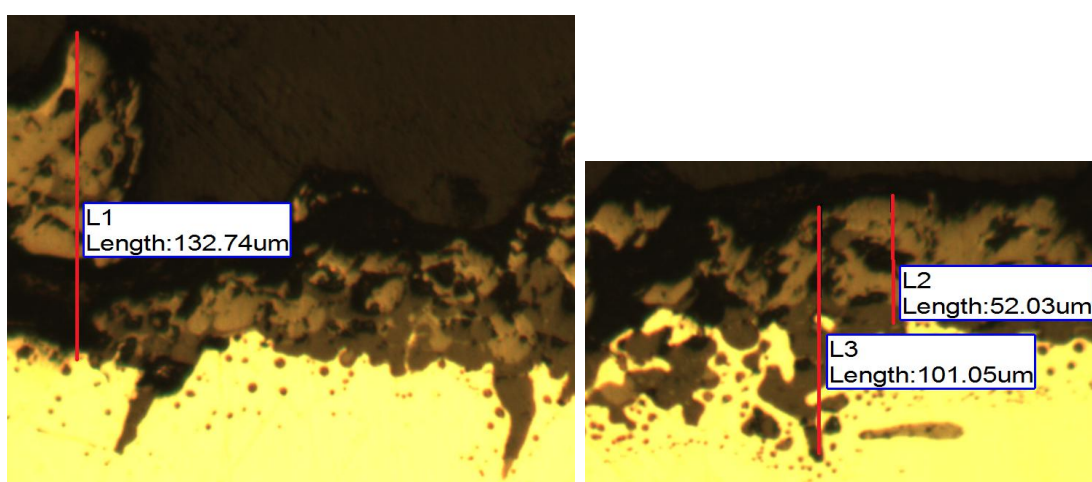


Obr. A.8: Experiment při času oxidace 30 minut (vlevo), 45 minut (uprostřed) a 60 minut (vpravo). Měřítka je u všech snímků stejné.

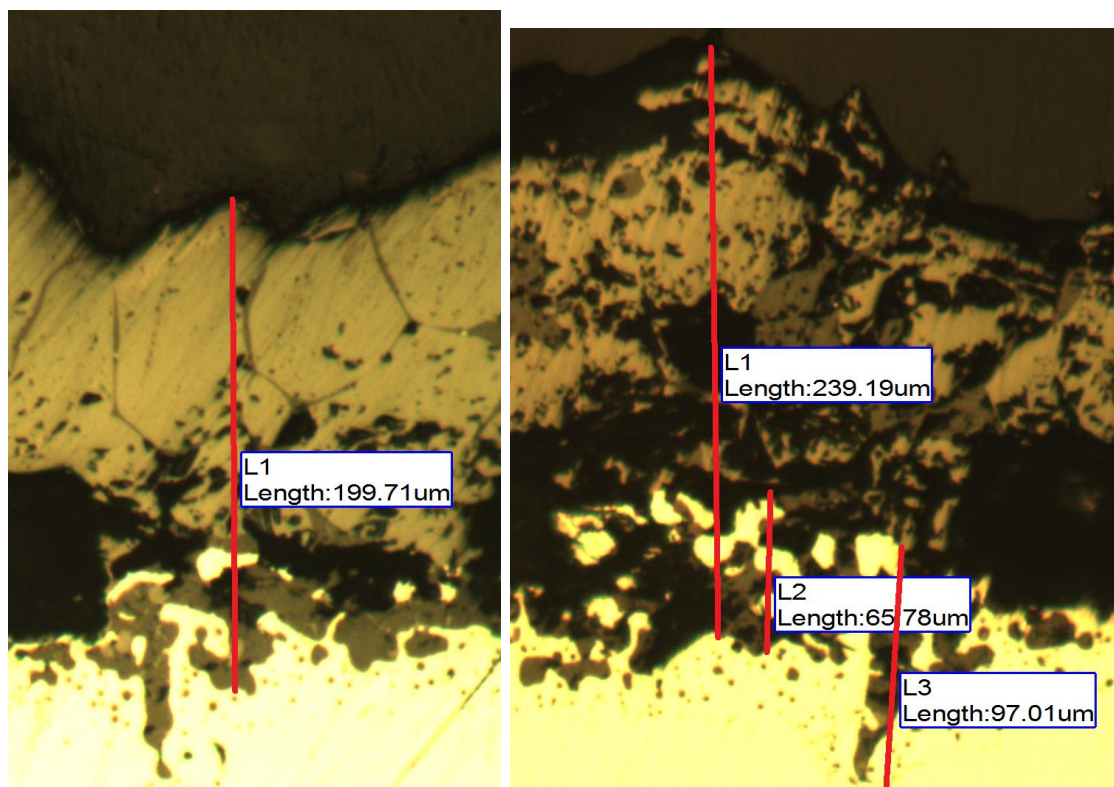
## Fotografie vrůstů okují do původního materiálu



Obr. A.9: Vrstvání u vzorku při času oxidace 15 minut.



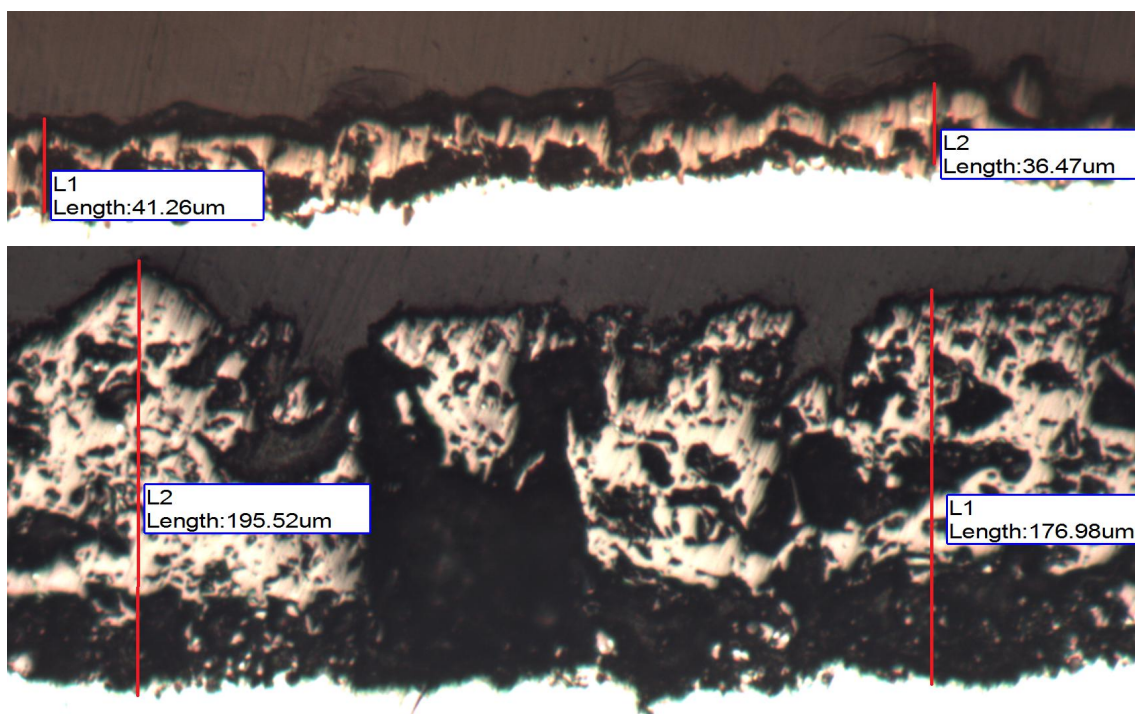
Obr. A.10: Vrstvání u vzorku při času oxidace 30 minut.



Obr. A.11: Vrůstání u vzorku při času oxidace 45 minut (vlevo) a 60 minut (vpravo).  
Měřítka je u obou snímků stejné.



## A.2 | Ocel HDT580X



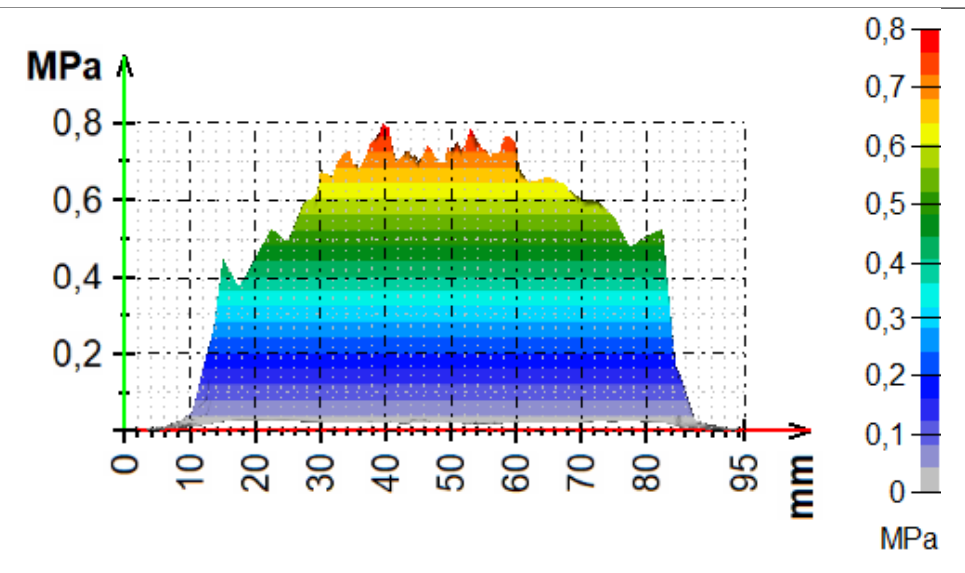
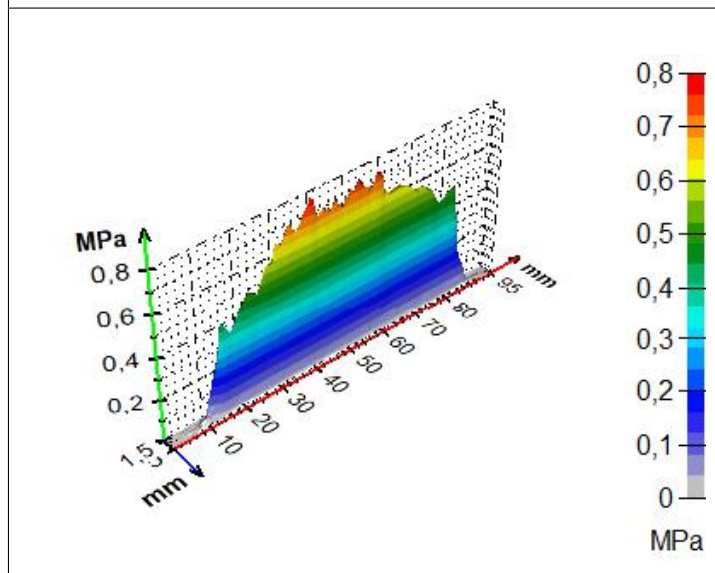
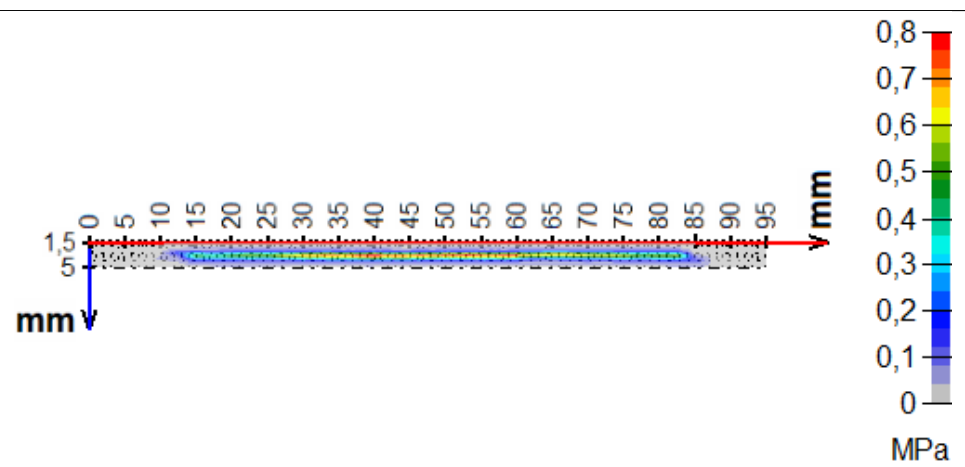
Obr. A.12: Vrstva okují na oceli HDT580X při teplotě oxidace 1 200 °C a času 120 min. Zkoumáno bylo místo s nižší (nahore) a vyšší (dole) vrstvou okují. Měřítka je u obou snímků stejné.

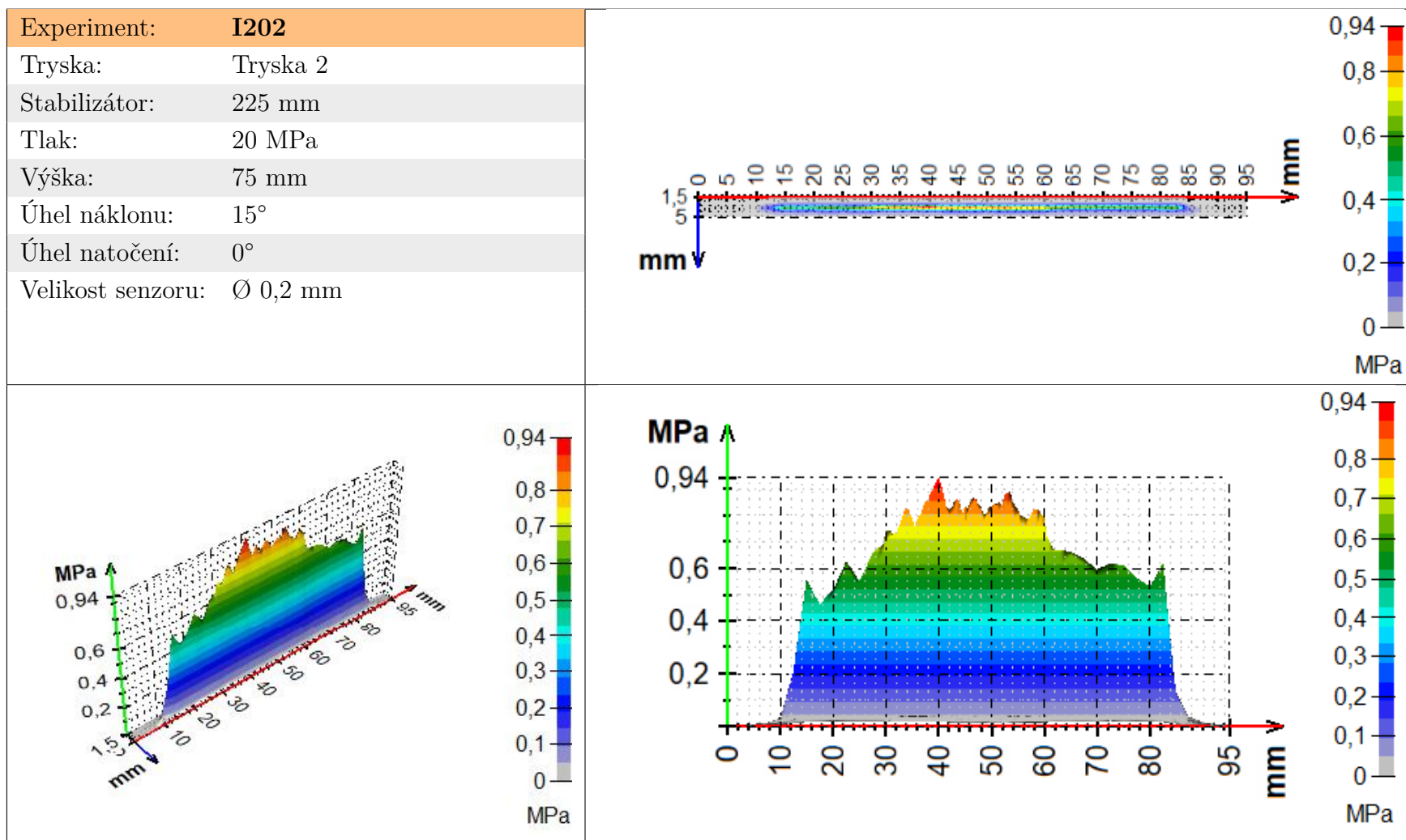
# PŘÍLOHA B

Experimentální určení vlivu  
stabilizátoru trysky na rozložení  
impaktního tlaku vodního paprsku

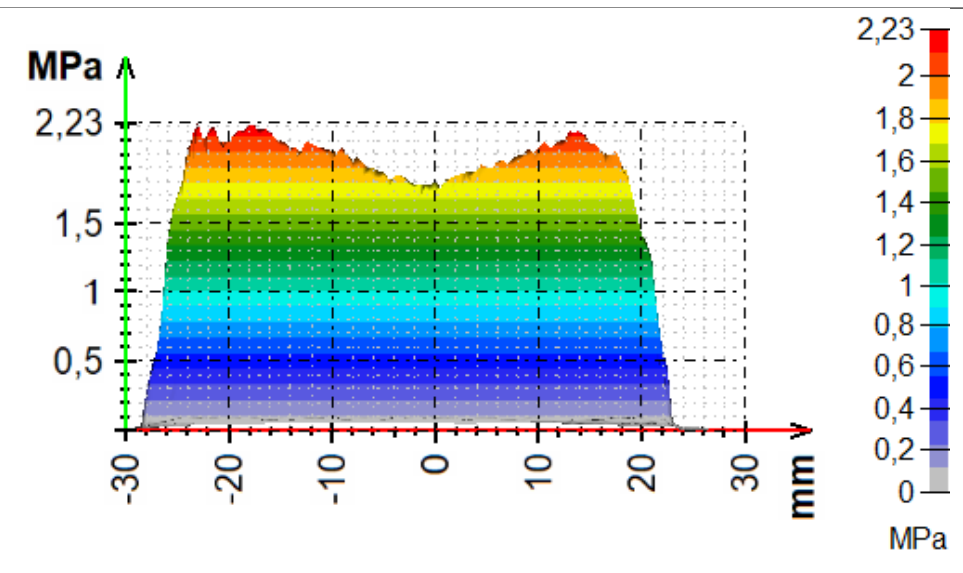
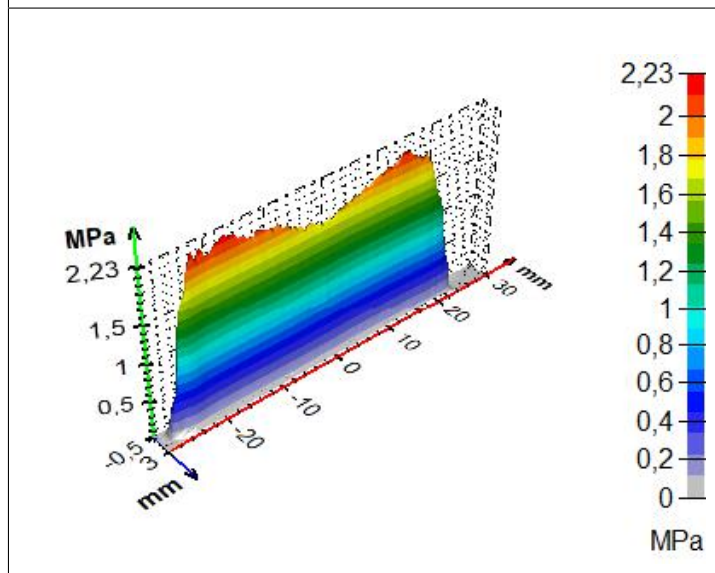
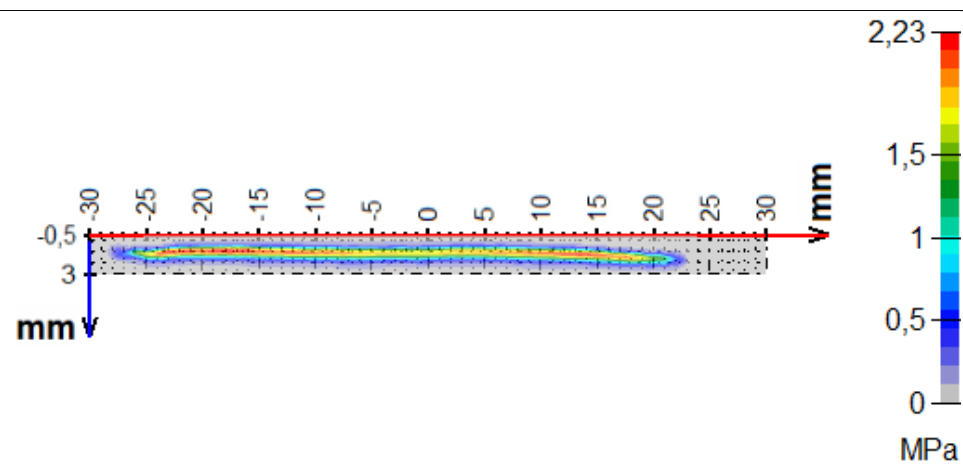


Experiment:	<b>I201</b>
Tryska:	Tryska 2
Stabilizátor:	101 mm
Tlak:	20 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	0°
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm

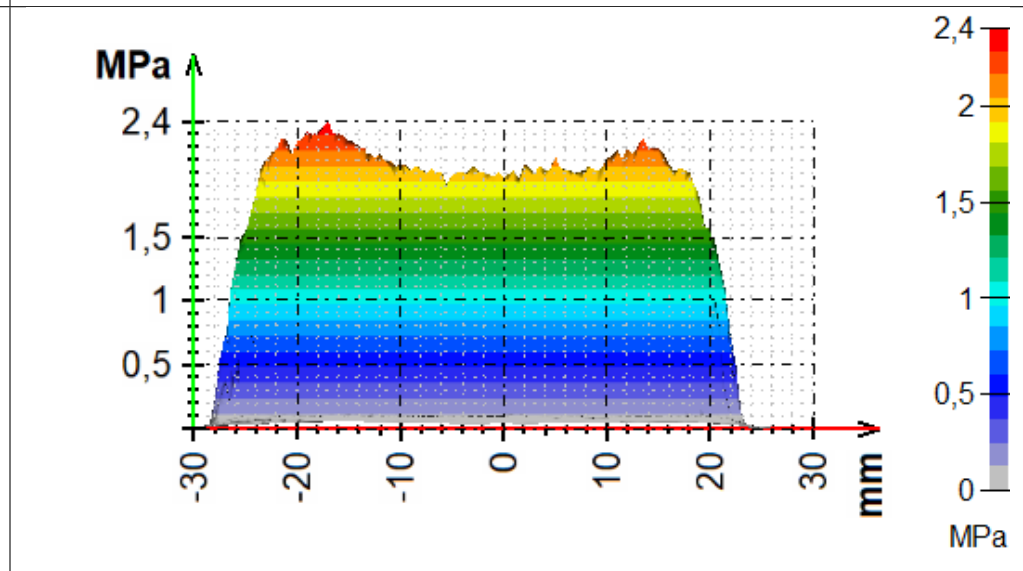
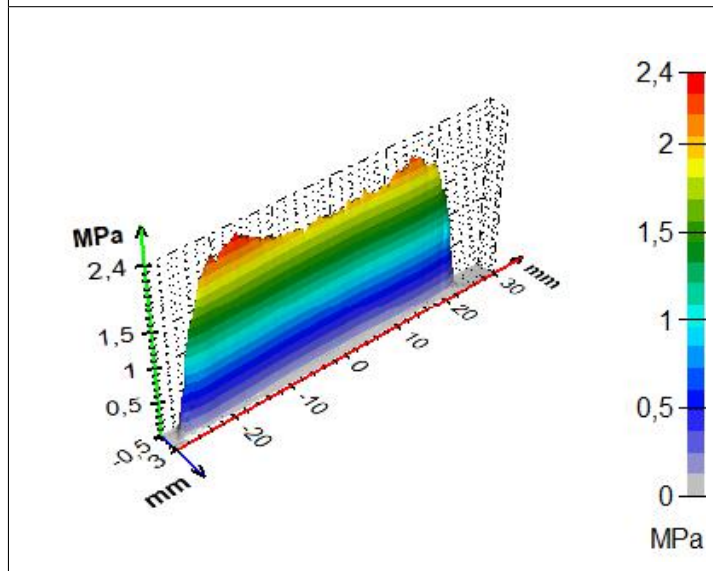
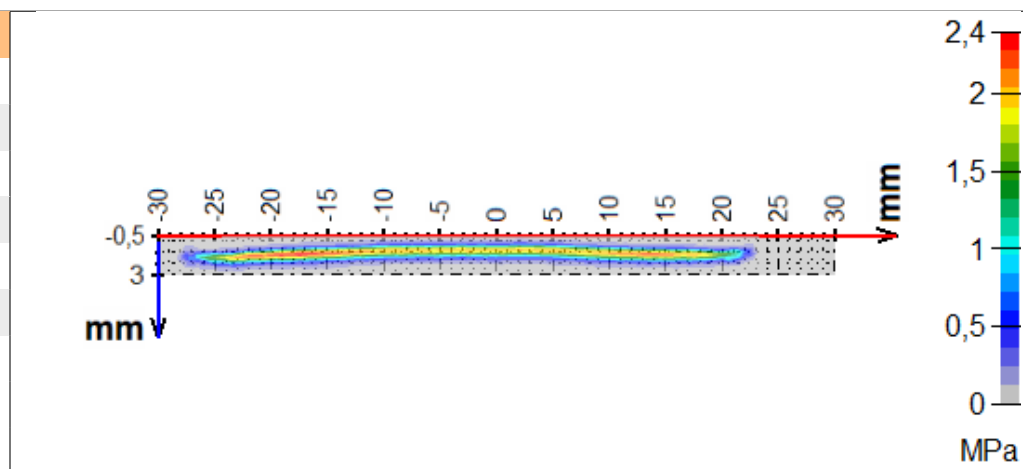




Experiment:	<b>I203</b>
Tryska:	Tryska 4
Stabilizátor:	121 mm
Tlak:	20 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	0°
Úhel natočení:	0°
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm



Experiment:	<b>I204</b>
Tryska:	Tryska 4
Stabilizátor:	130 mm
Tlak:	20 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	0°
Úhel natočení:	0°
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm





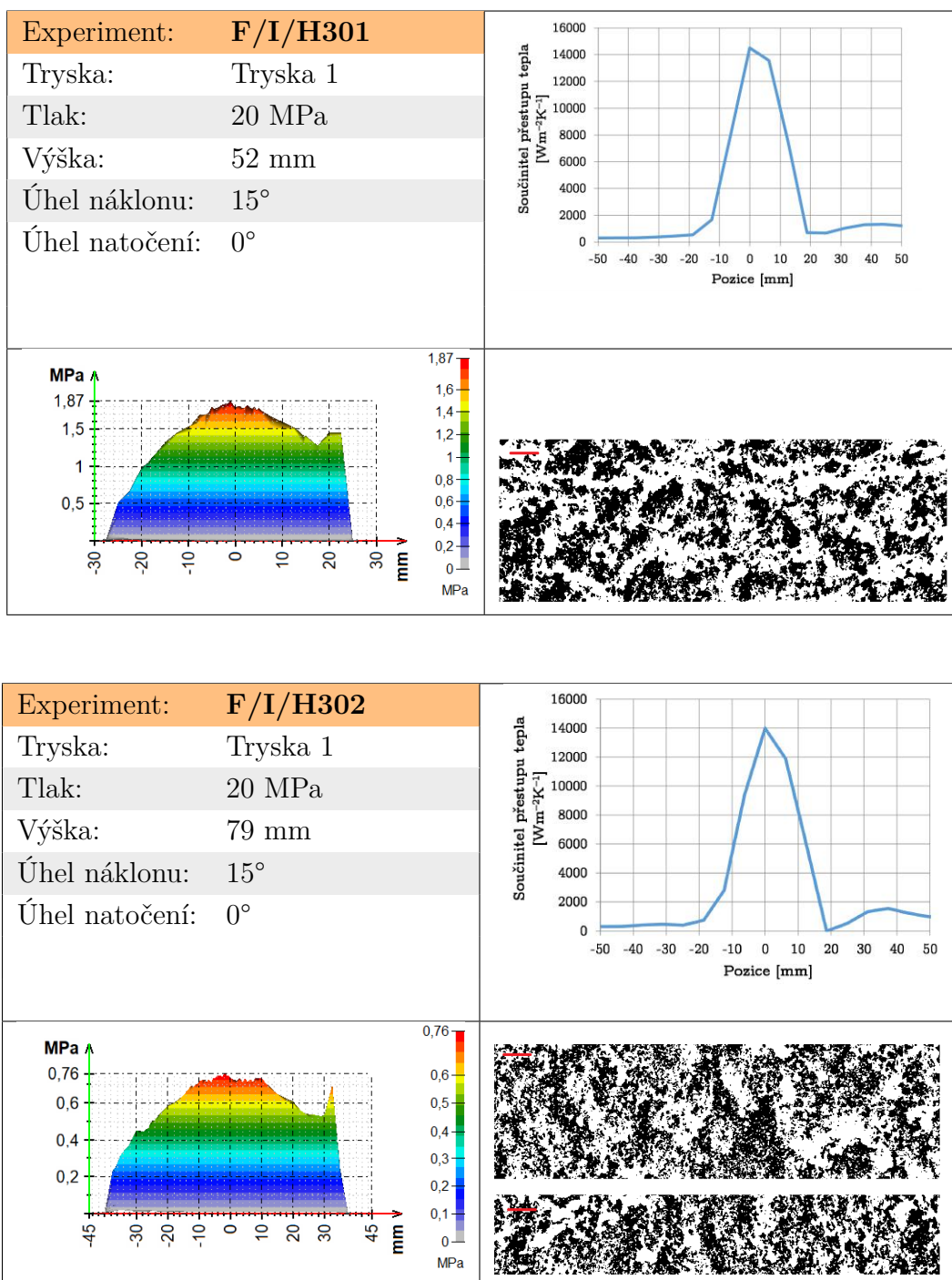
# Obrazová analýza struktury vodního paprsku

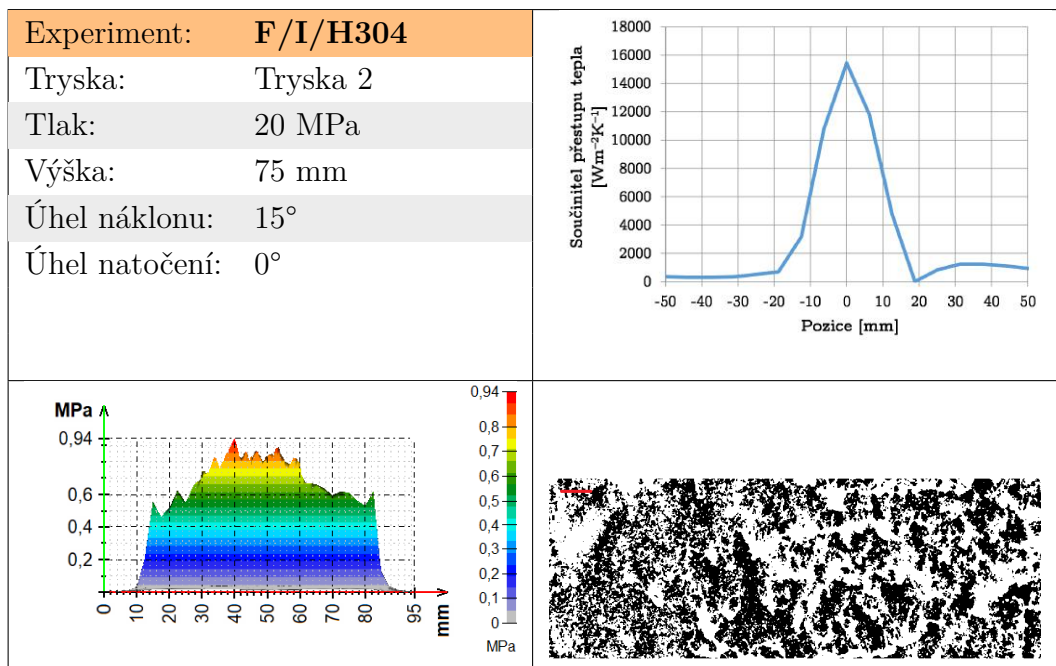
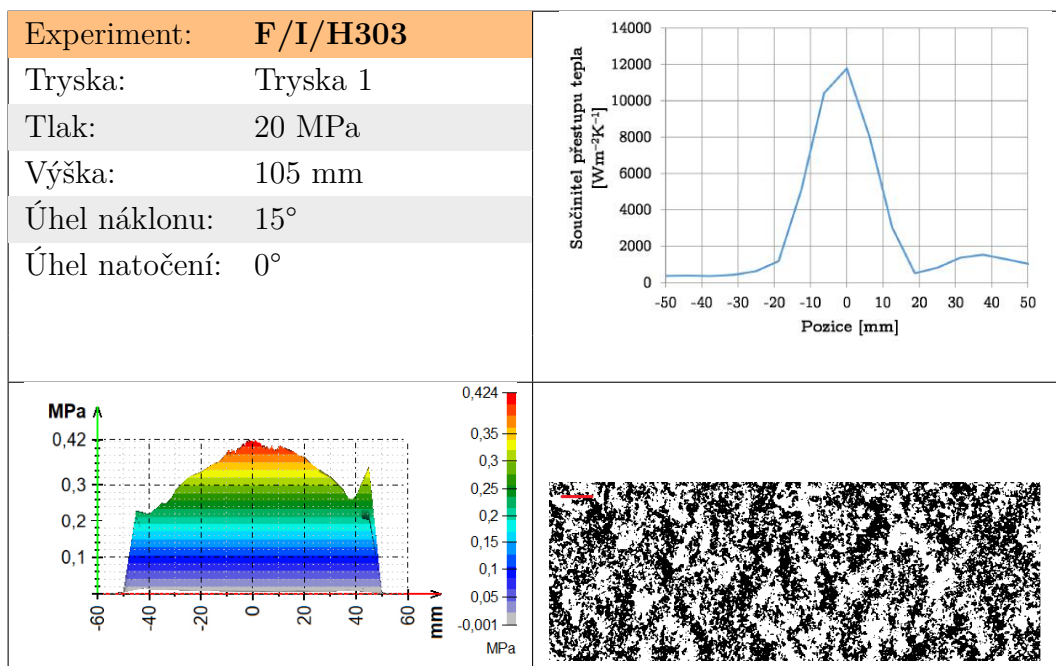
Základní skript pro zpracování stínografických fotografií

```
% začátek programu
clear; close all;
files = dir(strcat('*.bmp')); numfiles = length(files);
% matice pro výsledky
pocet = zeros(numfiles,1); obsahvody = zeros(numfiles,1);
% zpracování jednotlivých fotografií
for i = 1:numfiles
    | % import dat, oříznutí a převedení do ČB
    | b = importdata(files(i).name,'?',2);
    | figure, imshow(b(1:1595, 50:1246, :));
    | A = rgb2gray(b(1:1595, 50:1246, :));
    | % převedení ČB obrazu do binárního pomocí adaptivního prahování
    | bw = imbinarize(imcomplement(A),'adaptive','Sensitivity',0.60); imshow(bw);
    | % identifikace jednotlivých souvislých celků a jejich hranice
    | [B,L,N,A] = bwboundaries(bw,'noholes');
    | figure(i); i;
    | pocet(i)=N; obsahvody(i)=nnz(L)/1909215;
    | % vykreslení celků v obraze
    | imshow(label2rgb(L, @jet, [.5 .5 .5])); hold on;
    | % vykreslení vypočtených hranic v obraze
    | for k = 2:length(B)
    | | boundary = Bk;
    | | plot(boundary(:,2), boundary(:,1), 'w', 'LineWidth', 2);
    | end
end
```

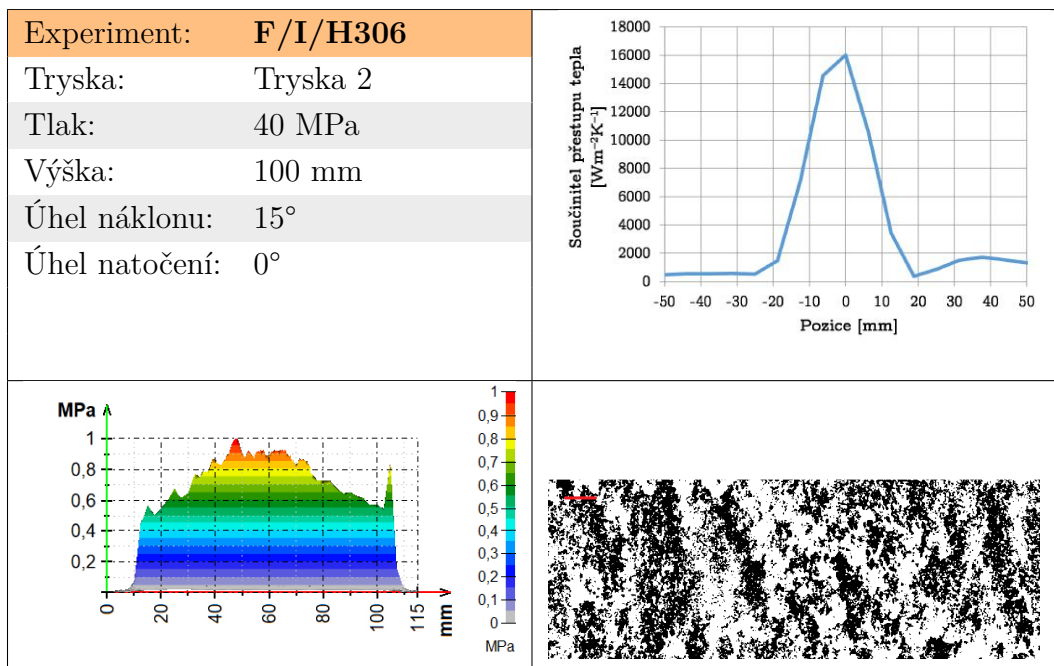
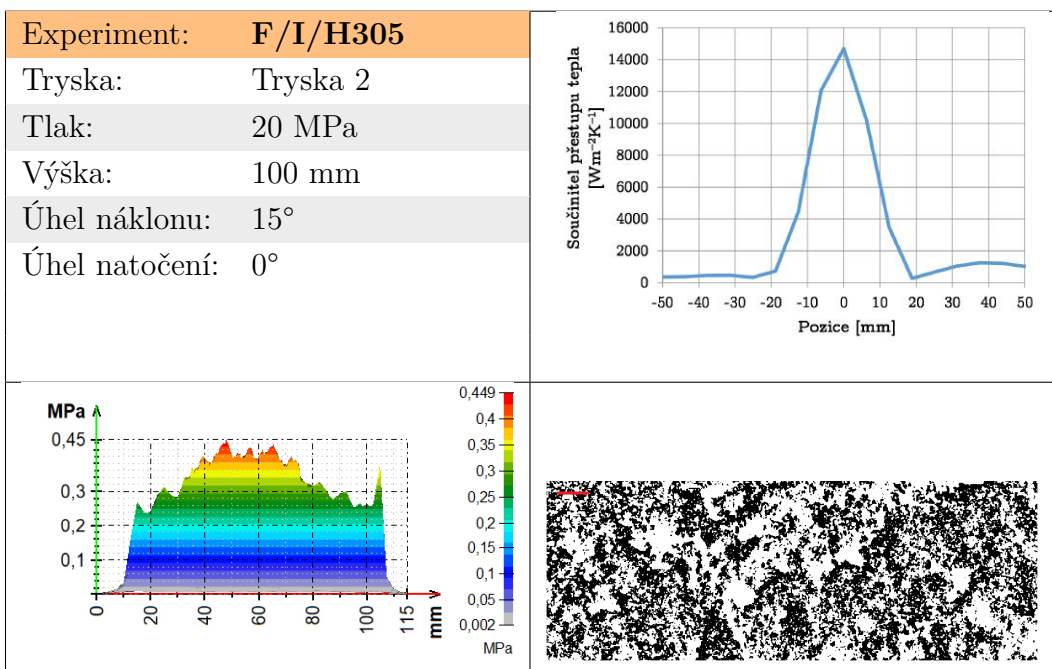
## Souhrnné výsledky experimentů

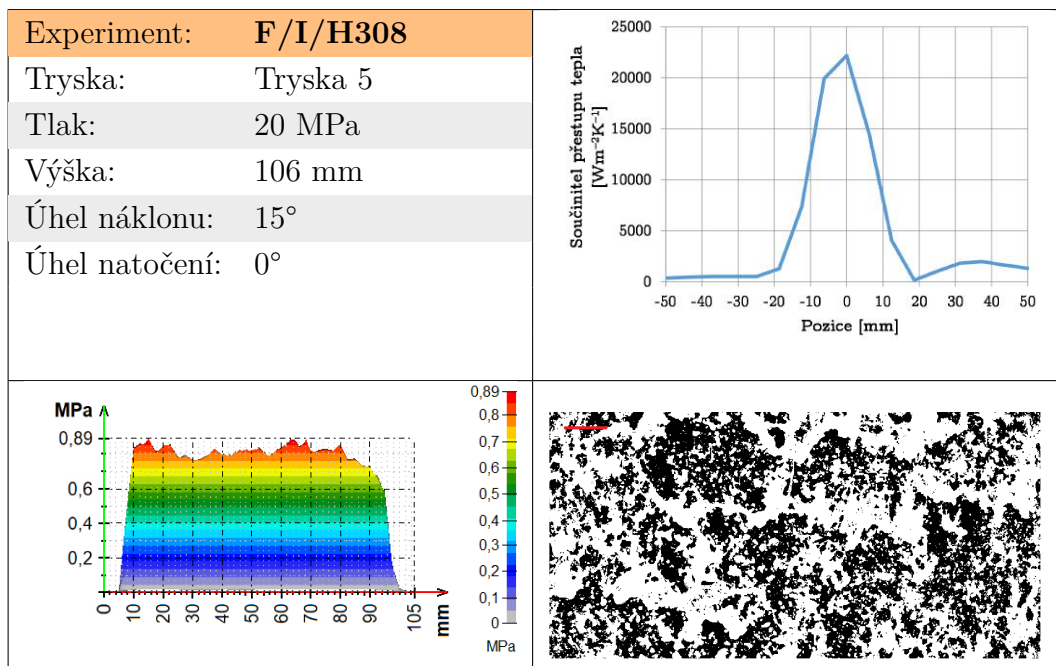
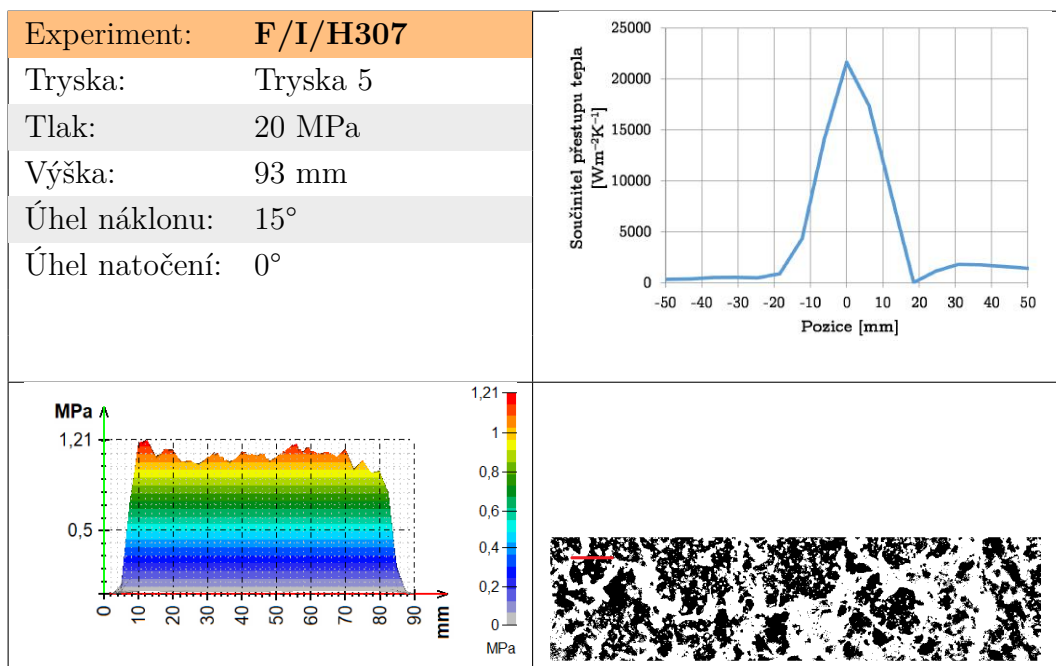
Každá trojice experimentů k příslušné konfiguraci je prezentována společně. Vodní paprsek je v obraze zobrazen bílou barvou, pozadí fotografie je černé. Červená úsečka představuje měřítko 1 mm.

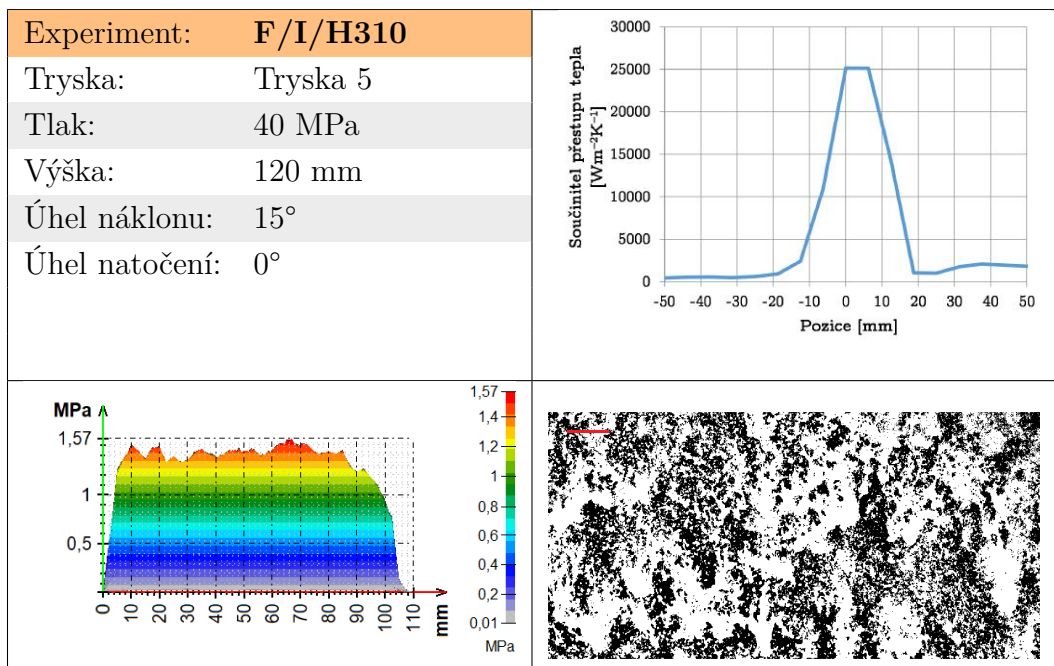
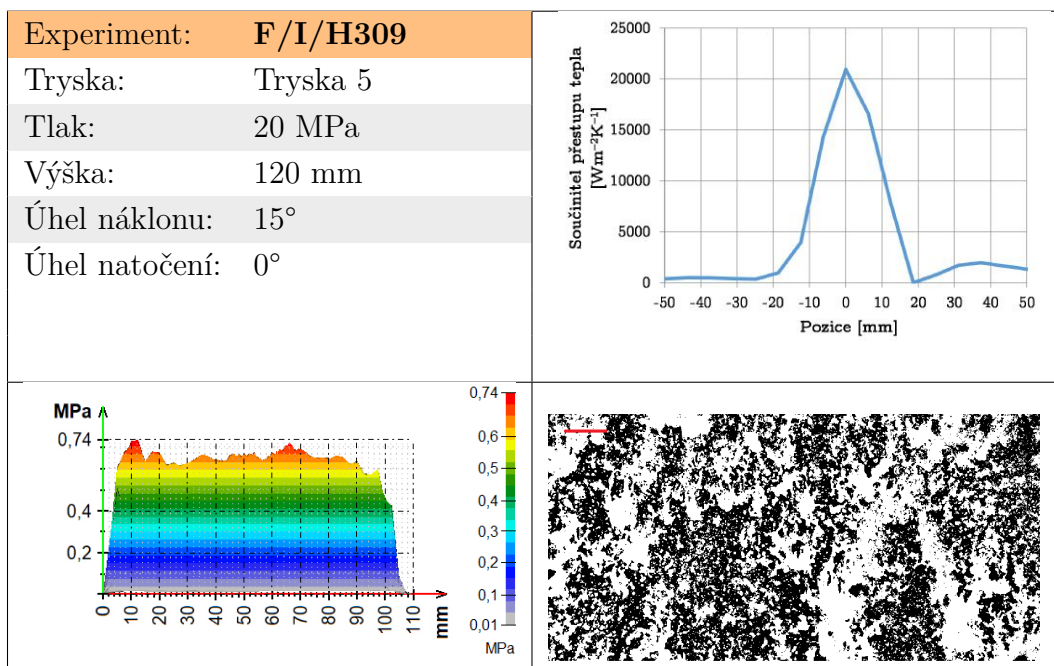


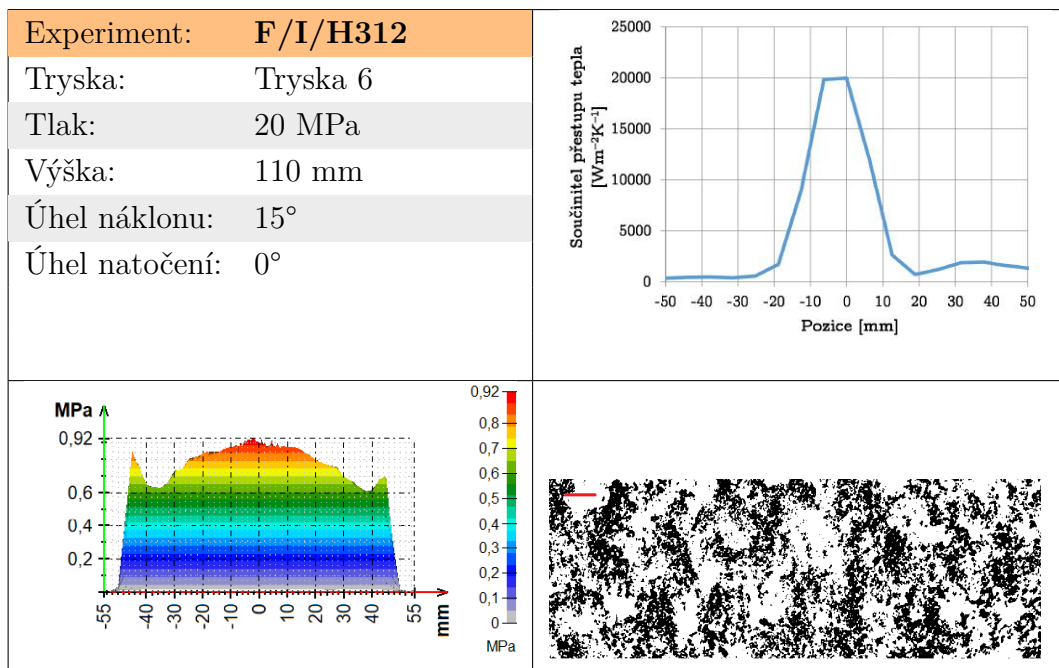
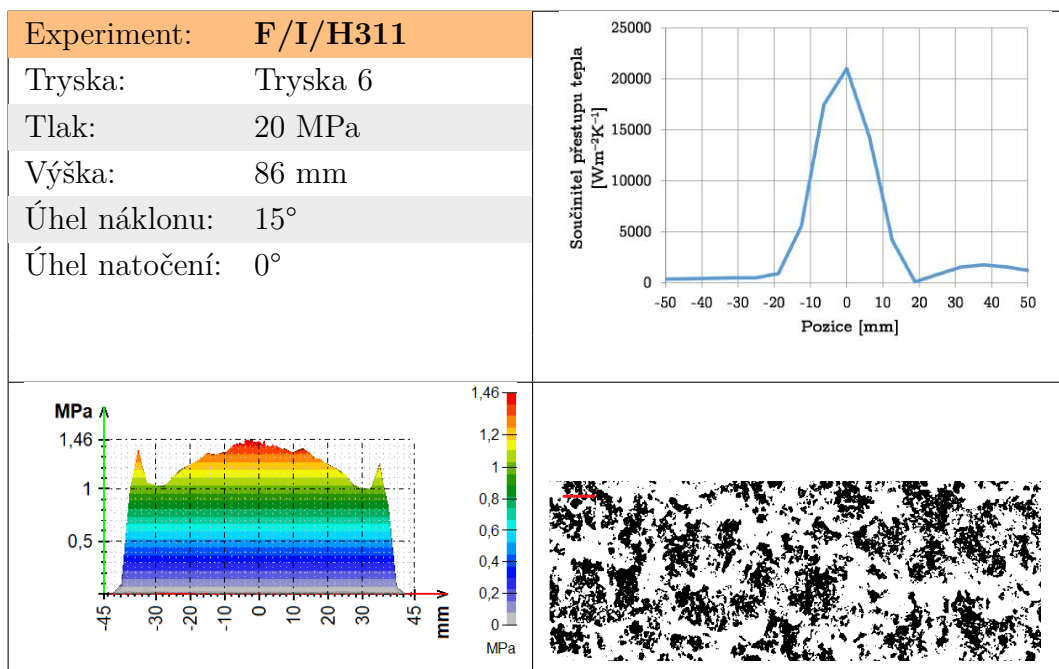


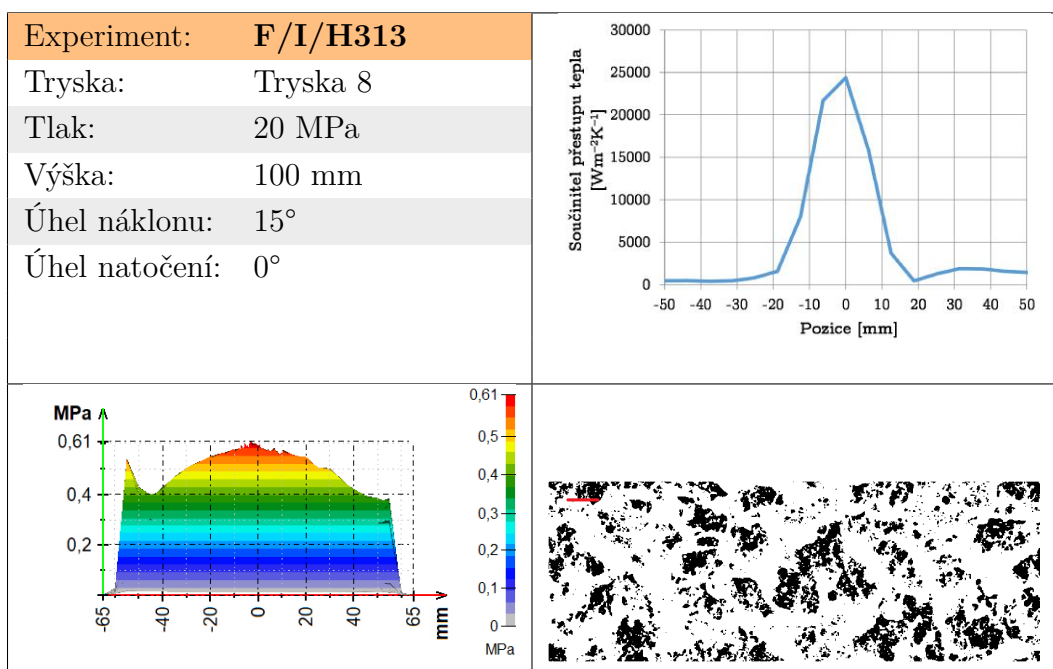




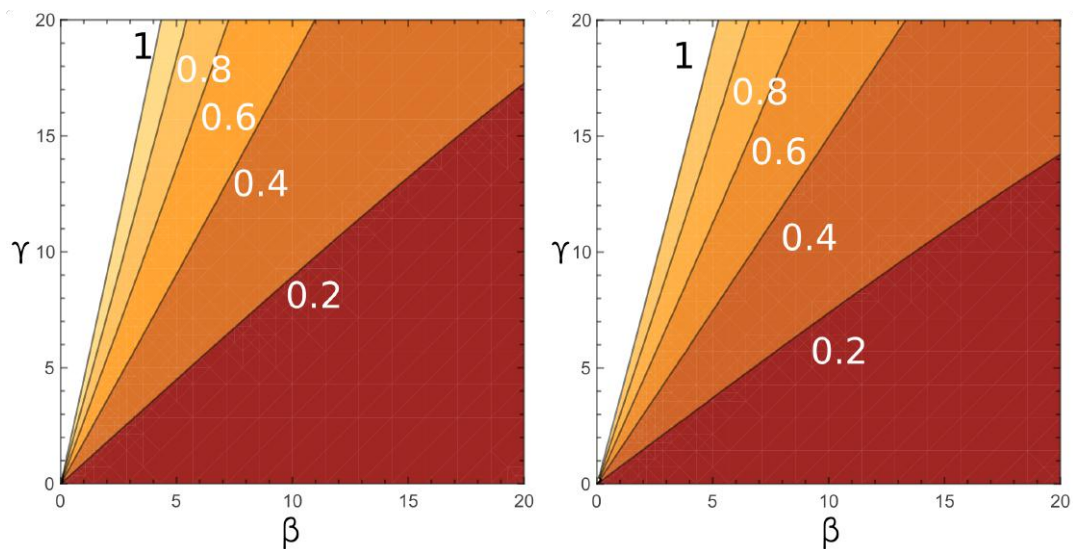






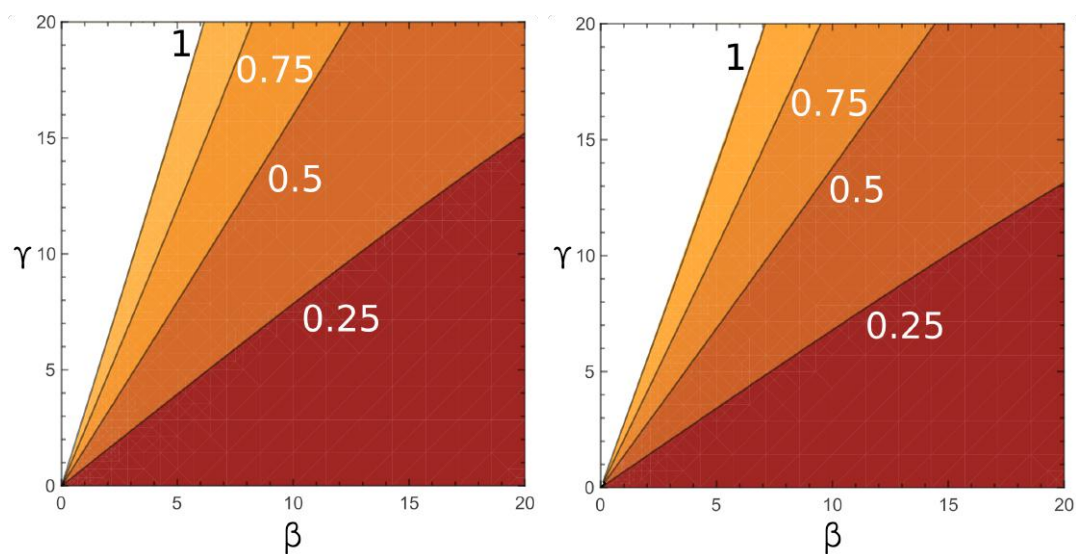


## Experimentální studium vlivu tlaku a vzdálenosti trysek na oblast překryvu vodních paprsků

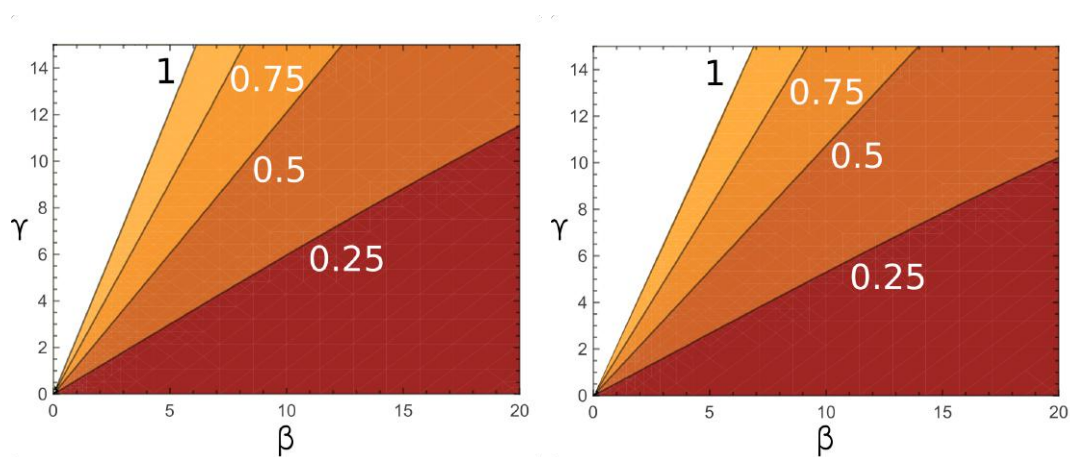


Obr. D.1: Procento šířky ostříkávaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku 25° (vlevo) a 30° (vpravo) stupňů

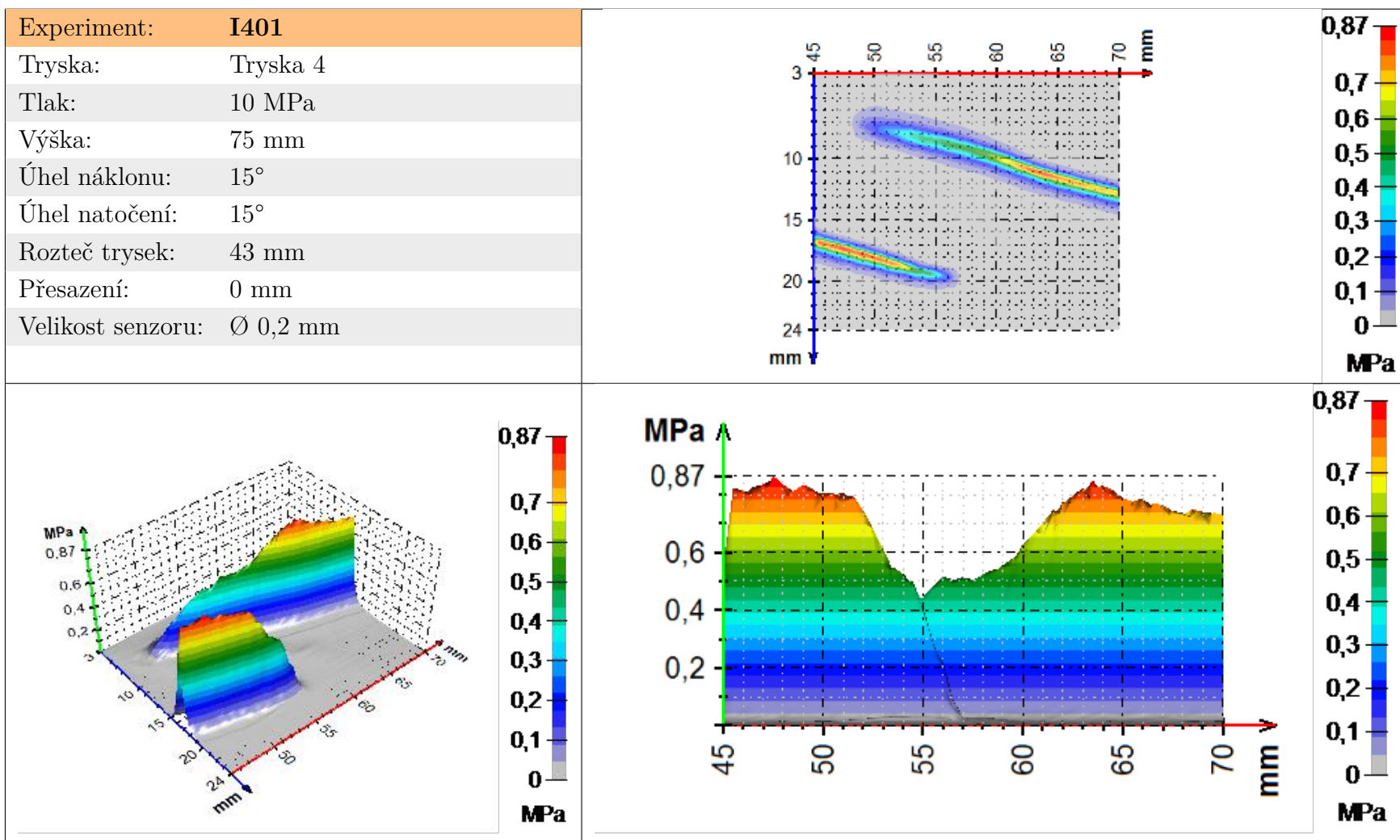




Obr. D.2: Procento šířky ostříkávaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku 35° (vlevo) a 40° (vpravo) stupňů

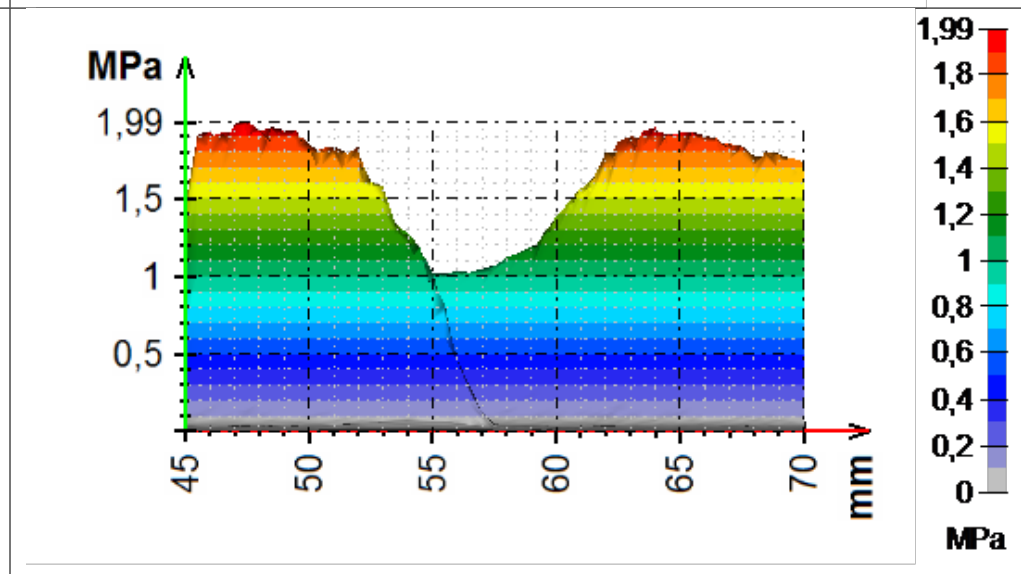
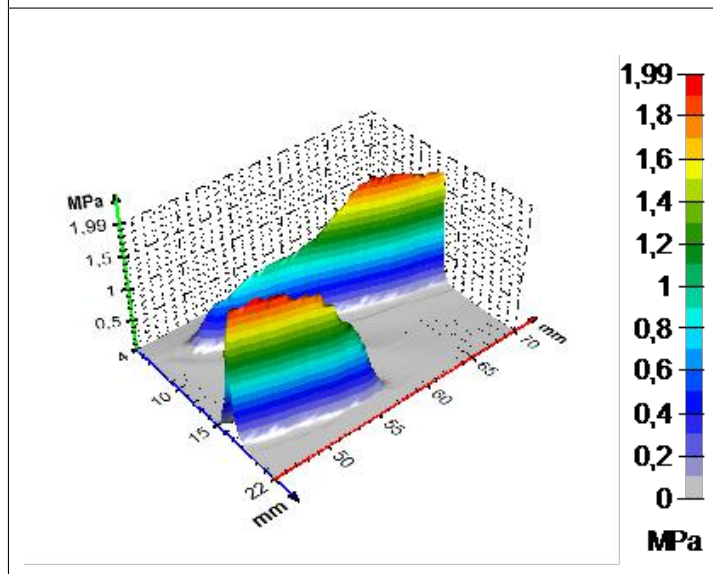
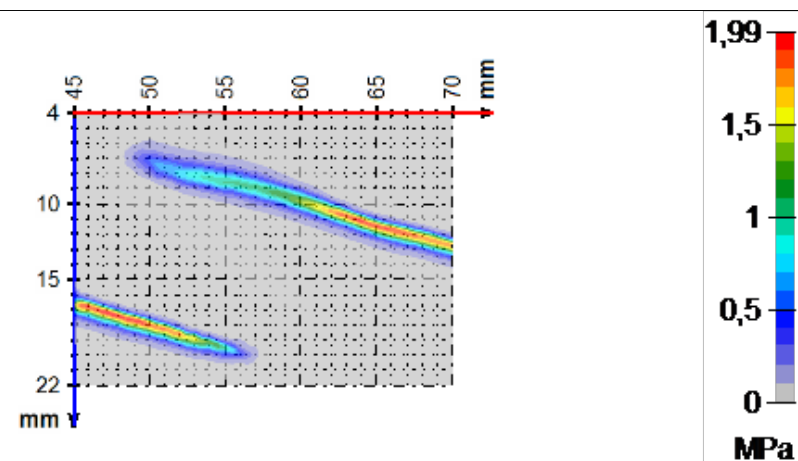


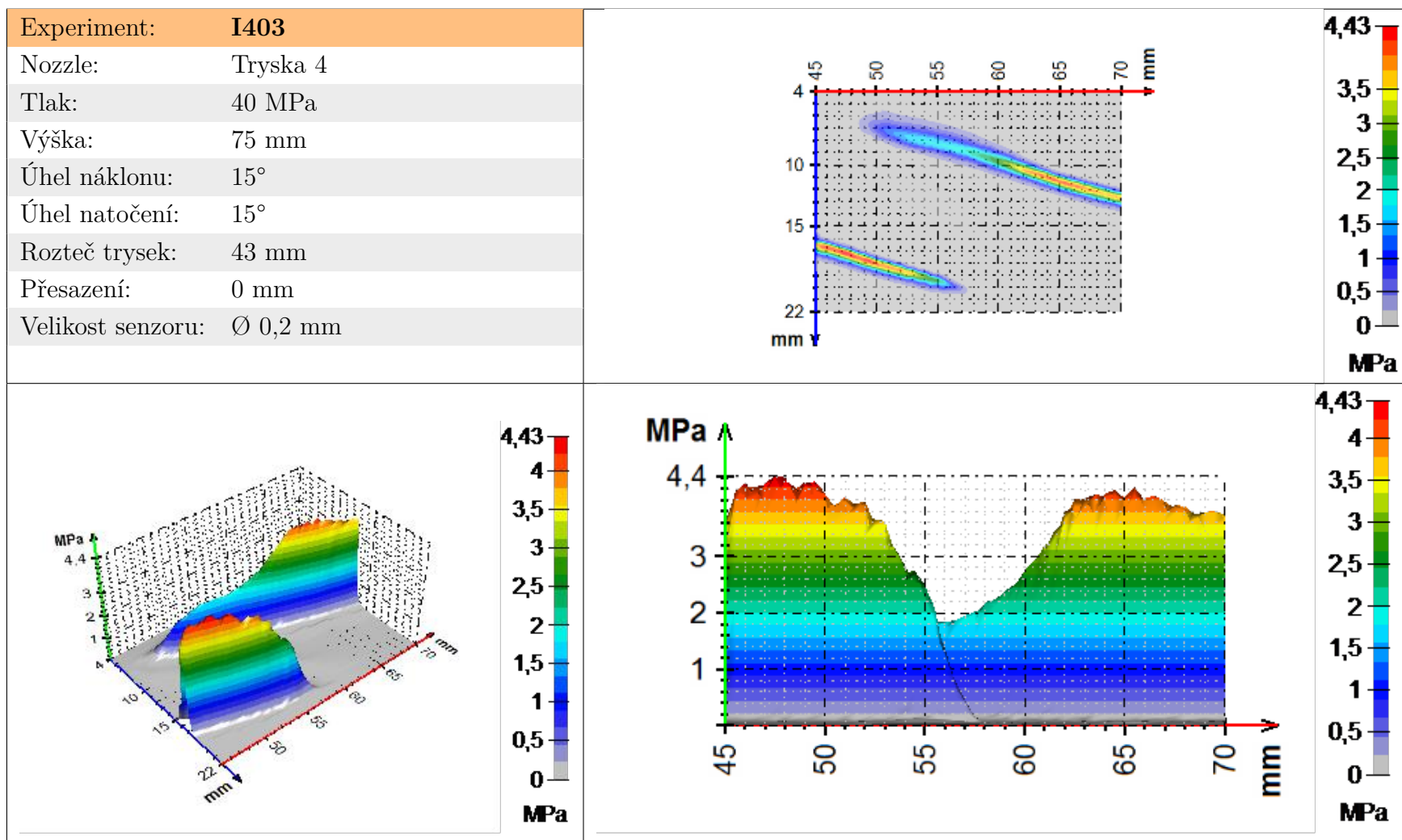
Obr. D.3: Procento šířky ostříkávaného povrchu ve washoutu pro trysky s úhlem rozstříku 45° (vlevo) a 50° (vpravo) stupňů



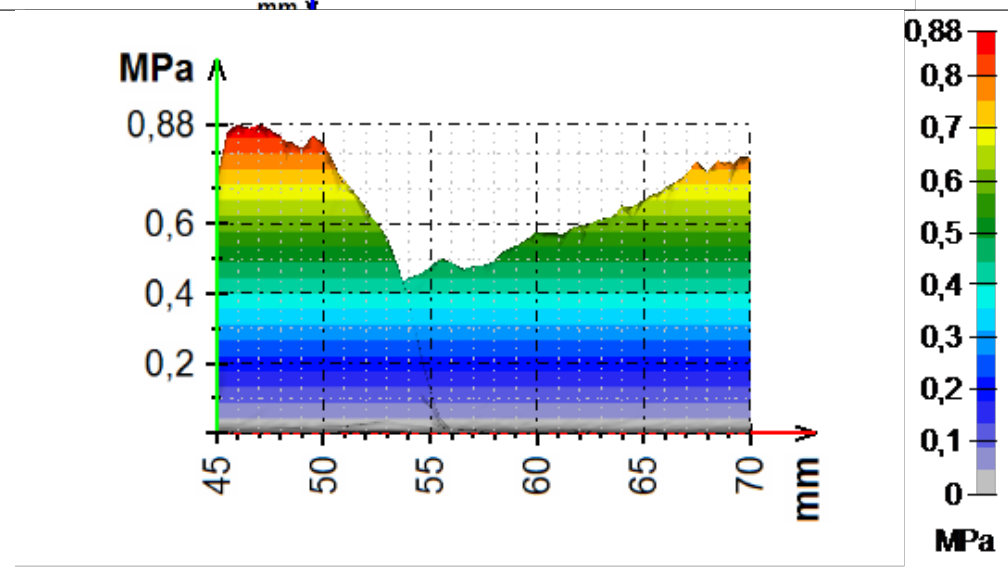
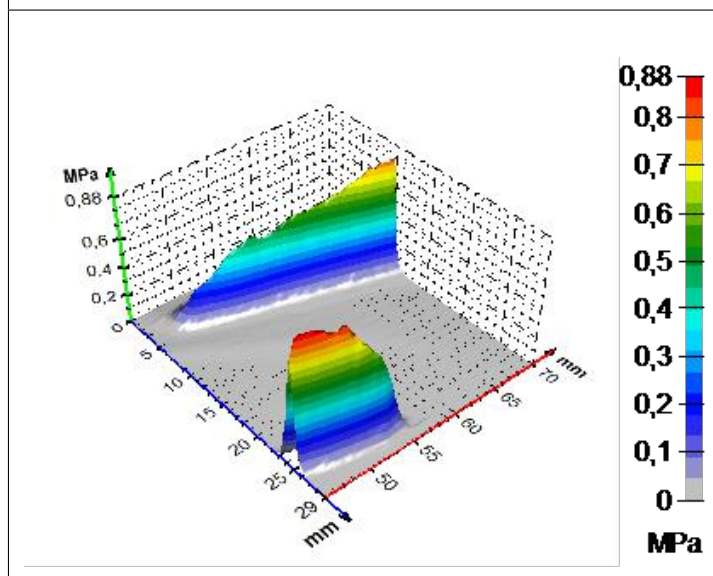
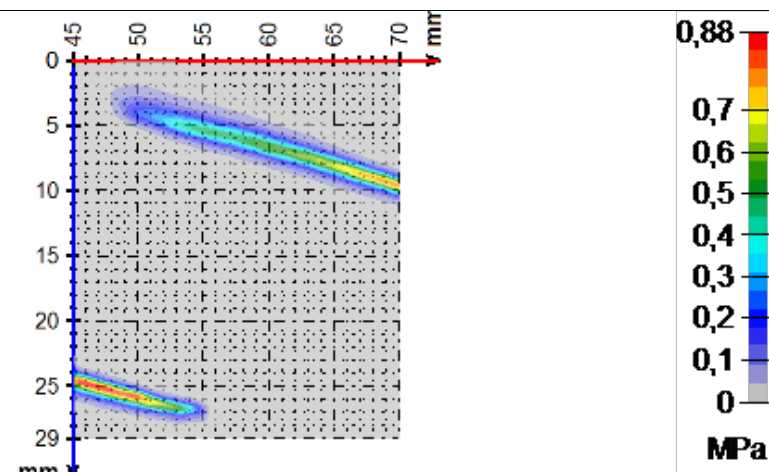


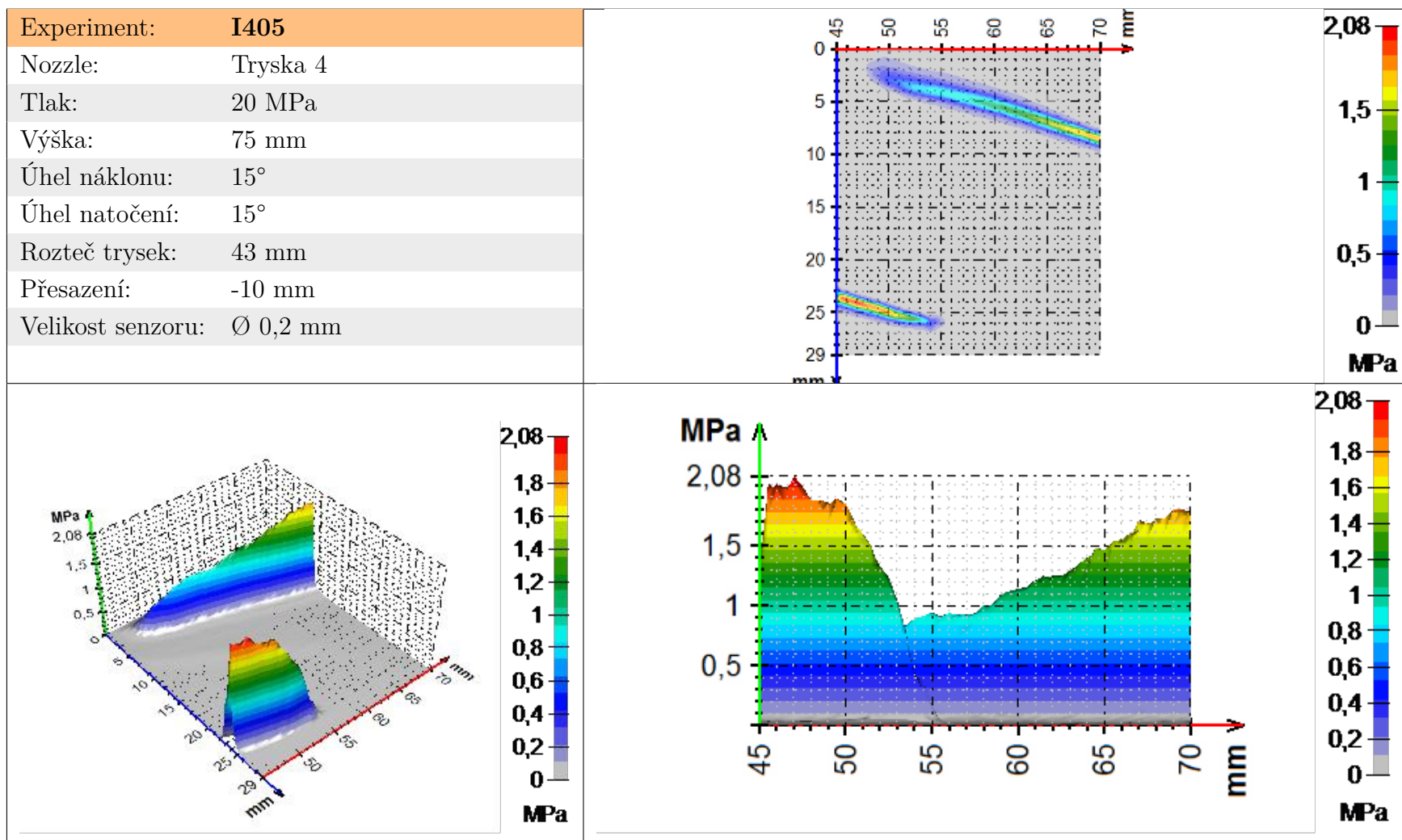
Experiment:	I402
Nozzle:	Tryska 4
Tlak:	10 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	15°
Rozteč trysek:	43 mm
Přesazení:	0 mm
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm



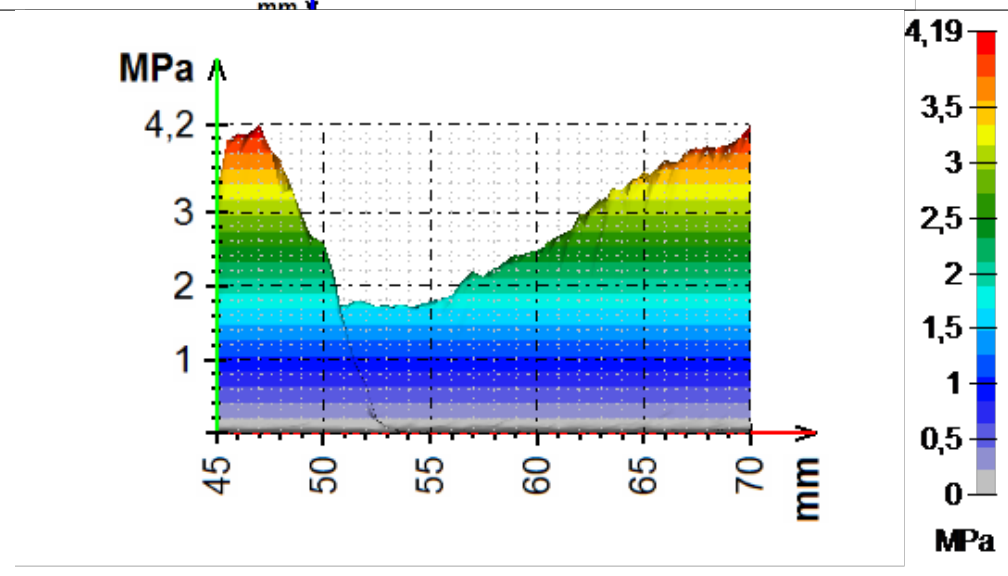
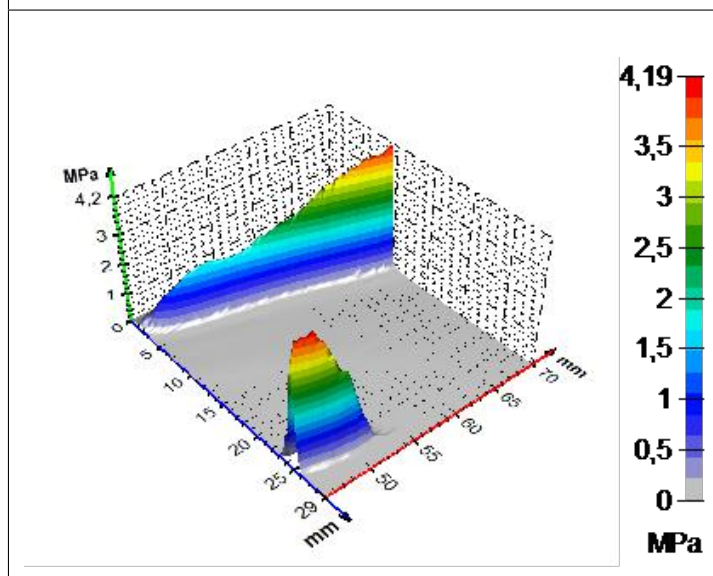
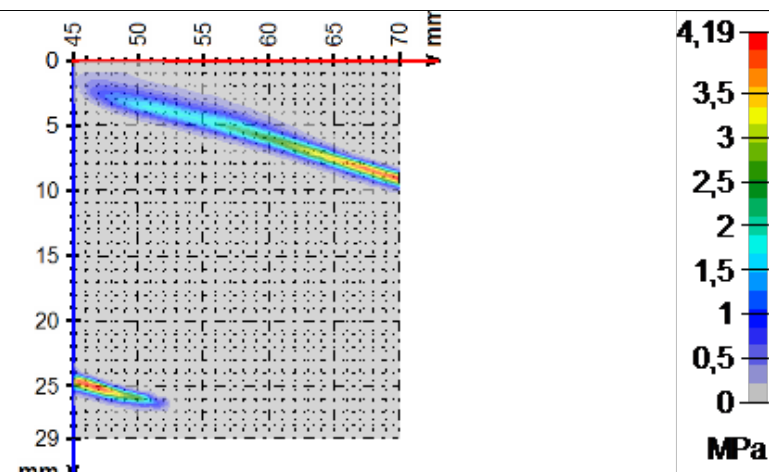


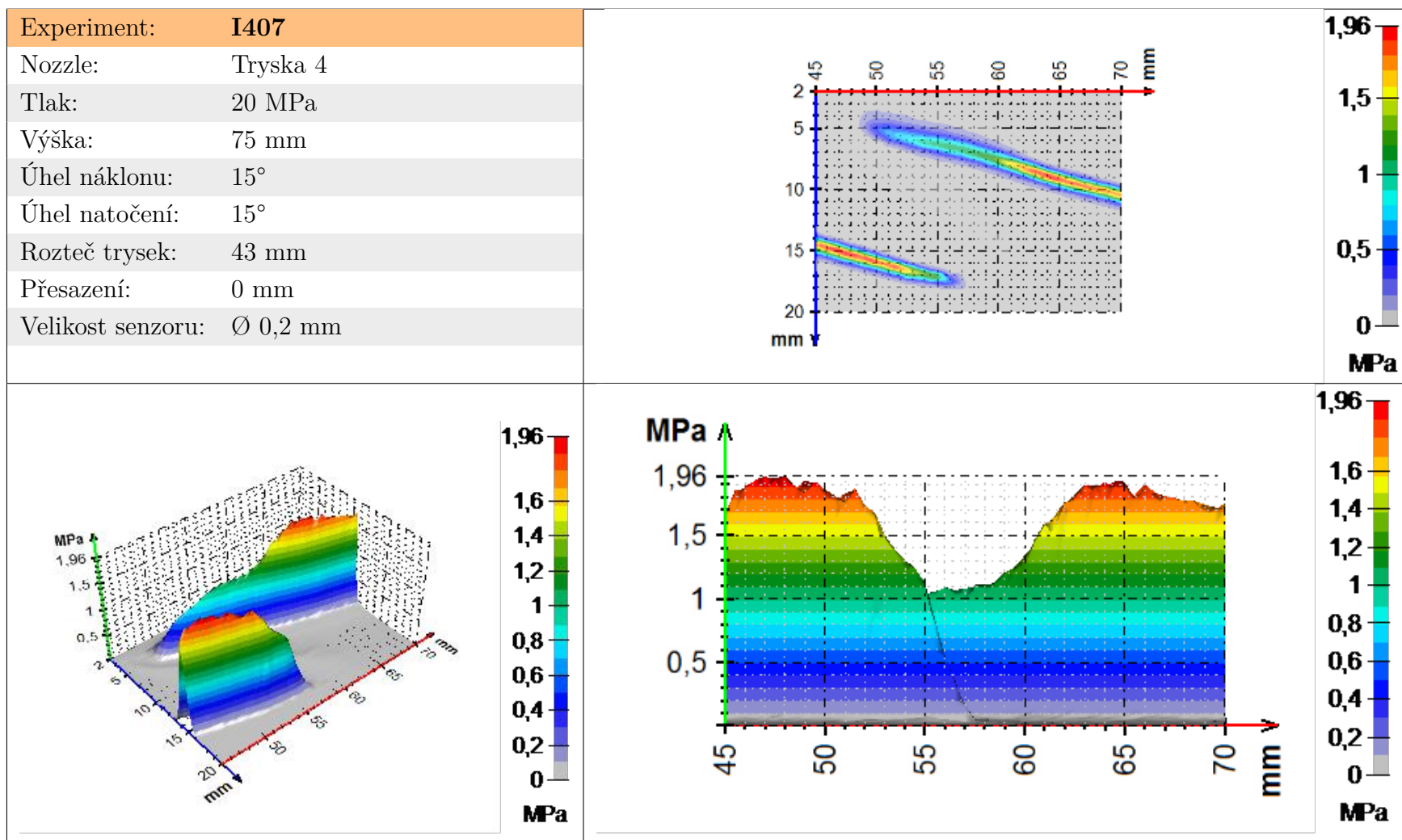
Experiment:	I404
Nozzle:	Tryska 4
Tlak:	10 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	15°
Rozteč trysek:	43 mm
Přesazení:	-10 mm
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm





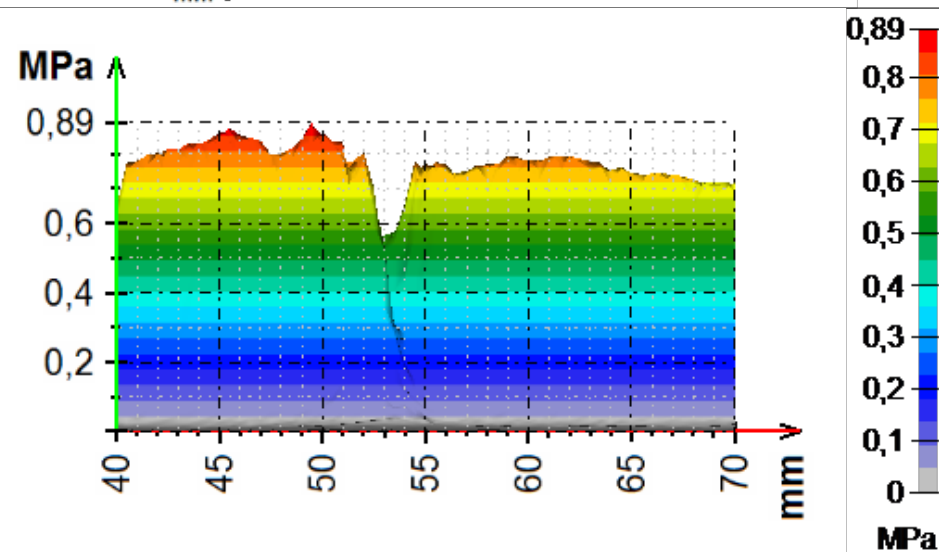
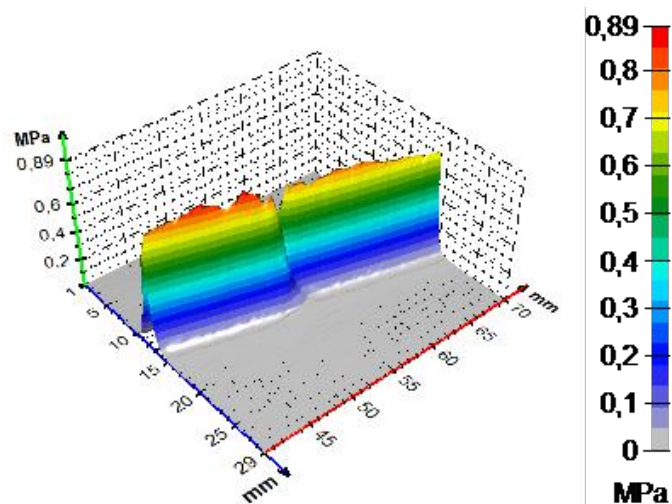
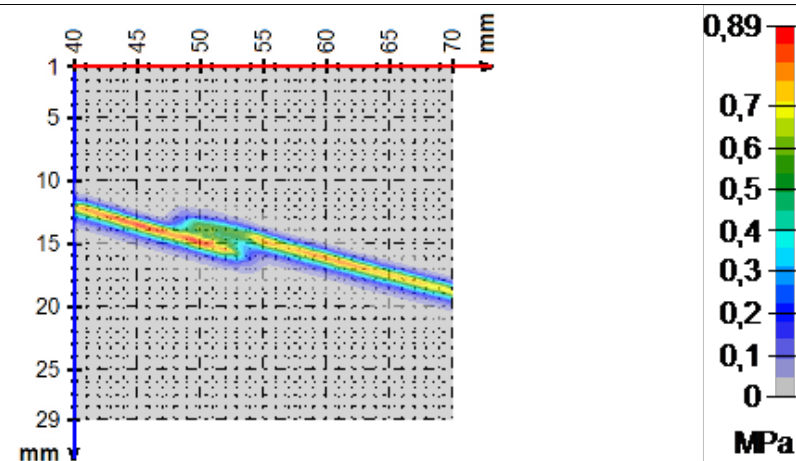
Experiment:	<b>I406</b>
Nozzle:	Tryska 4
Tlak:	40 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	15°
Rozteč trysek:	43 mm
Přesazení:	-10 mm
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm

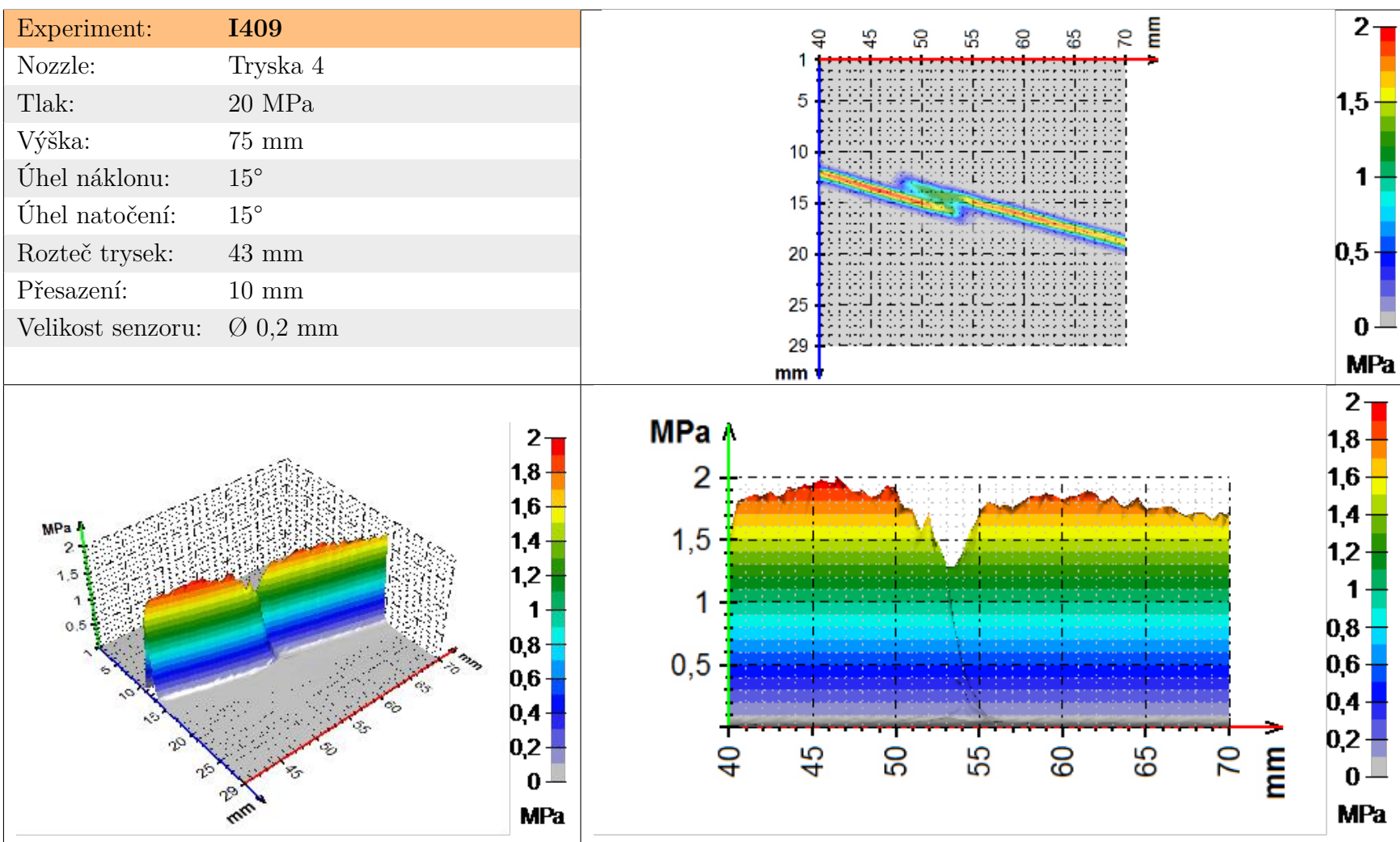






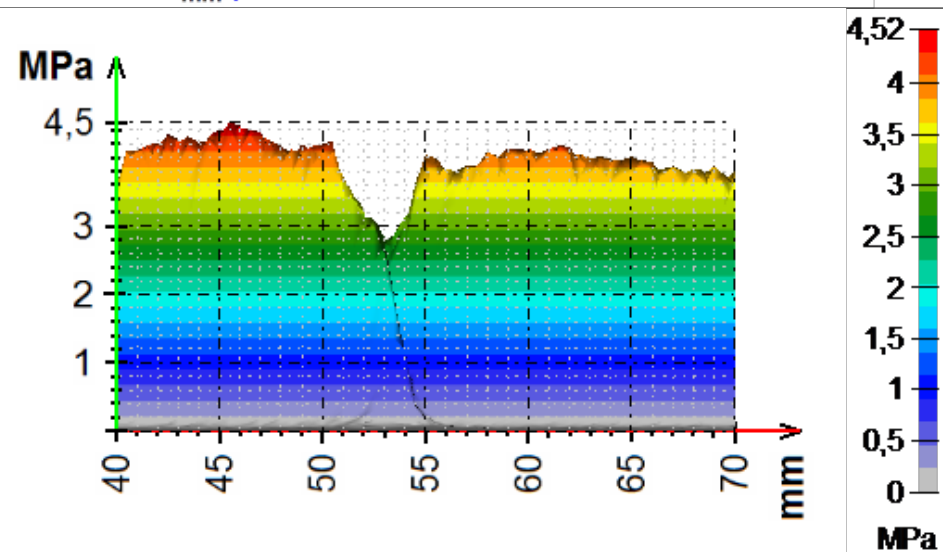
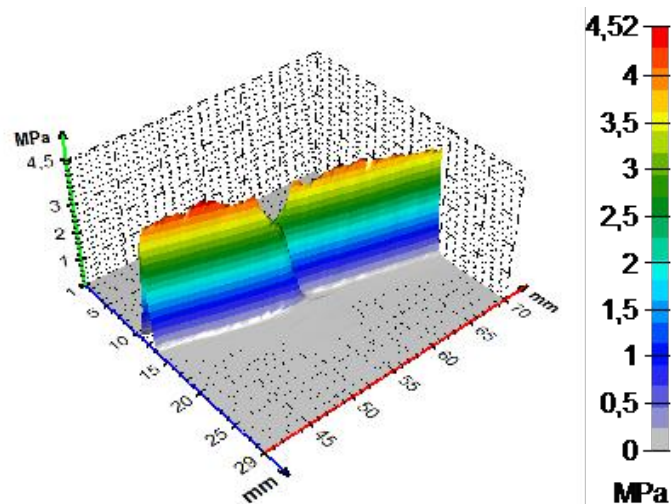
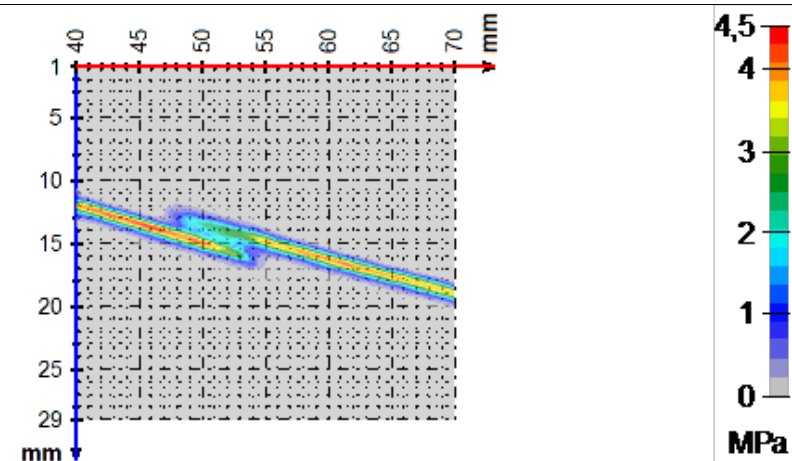
Experiment:	I408
Nozzle:	Tryska 4
Tlak:	10 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	15°
Rozteč trysek:	43 mm
Přesazení:	10 mm
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm







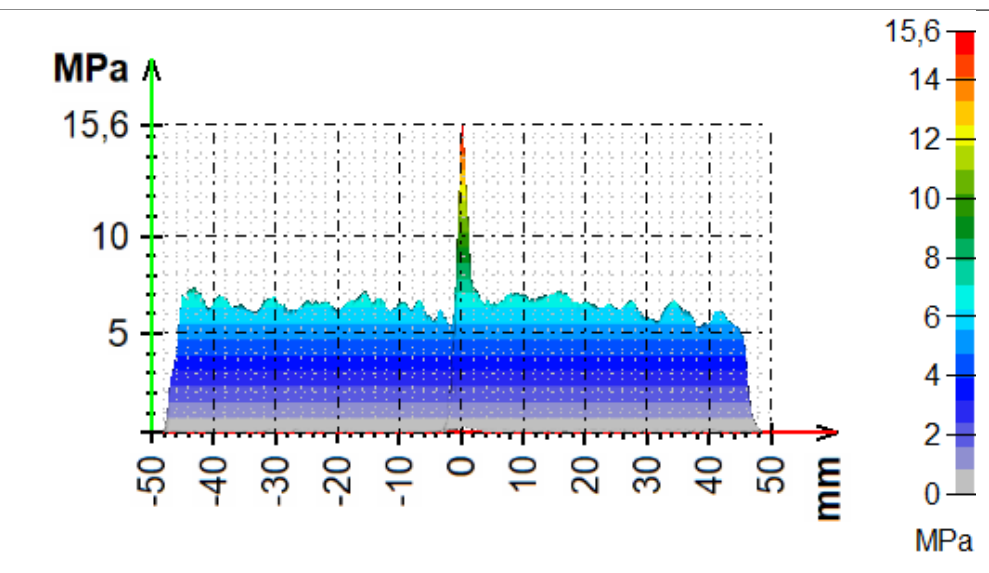
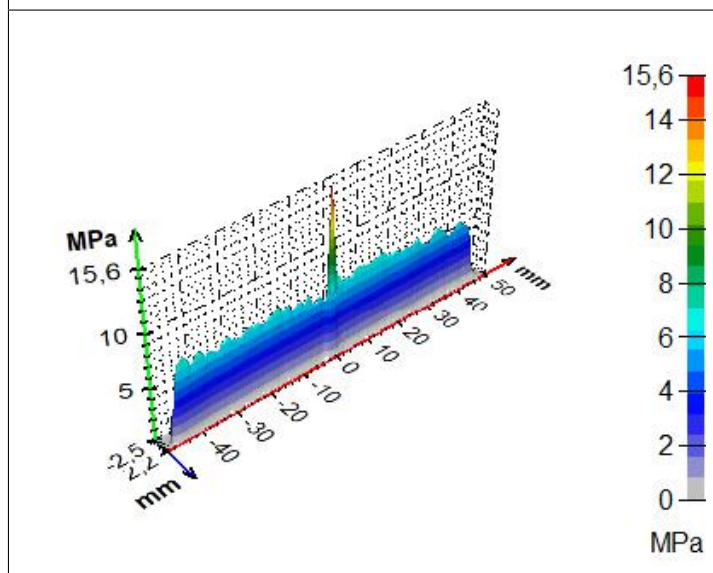
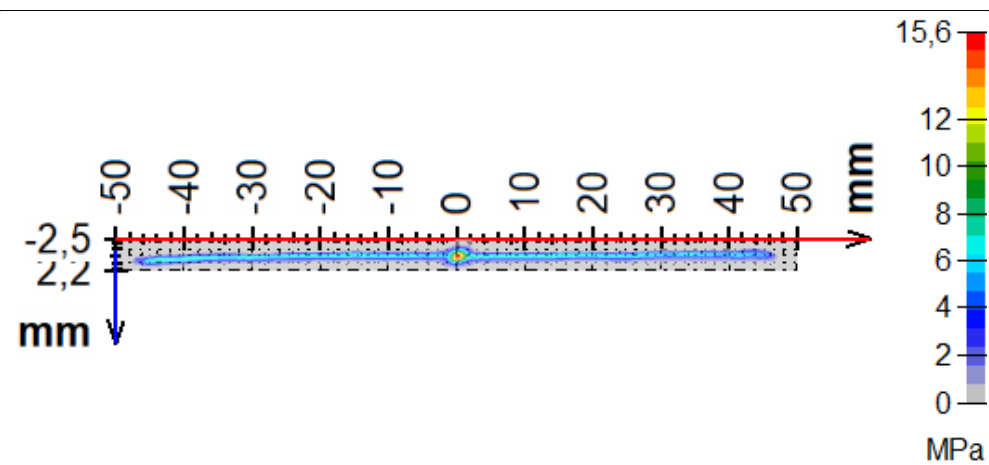
Experiment:	I410
Nozzle:	Tryska 4
Tlak:	40 MPa
Výška:	75 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	15°
Rozteč trysek:	43 mm
Přesazení:	10 mm
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm

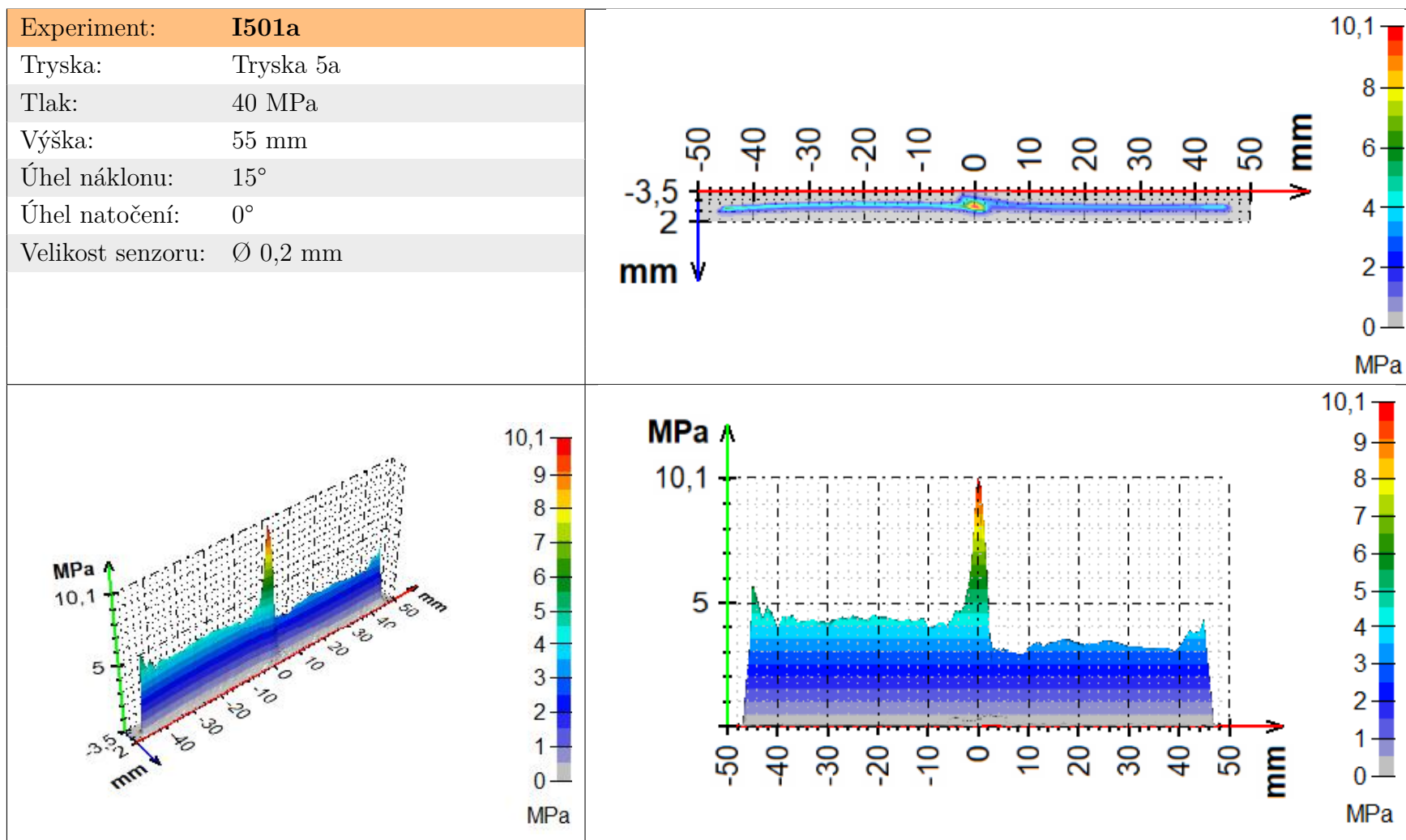


# PŘÍLOHA E

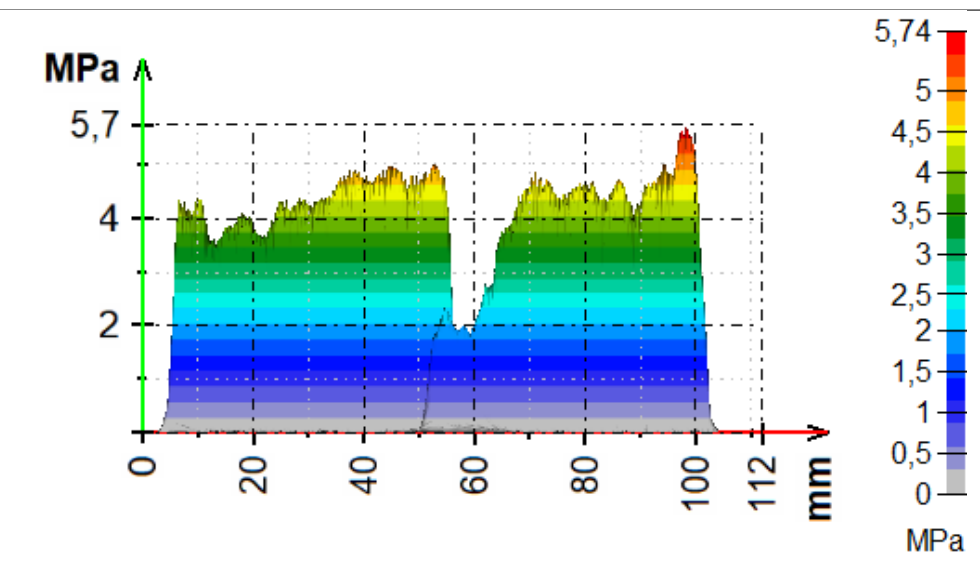
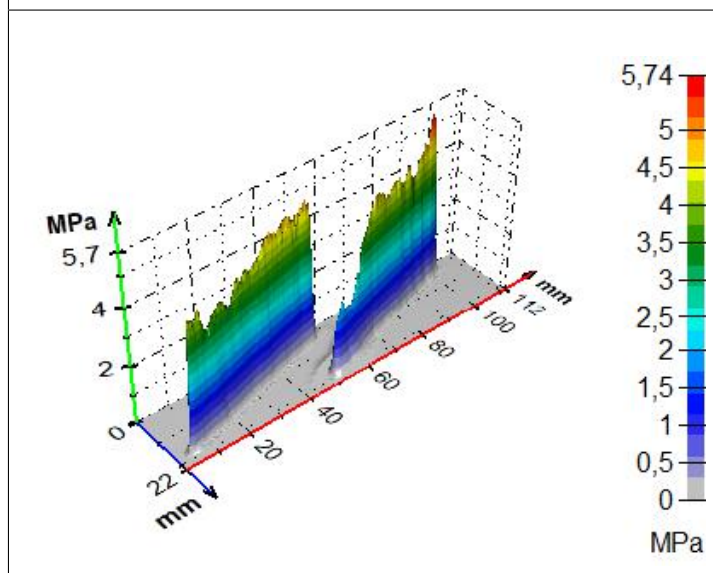
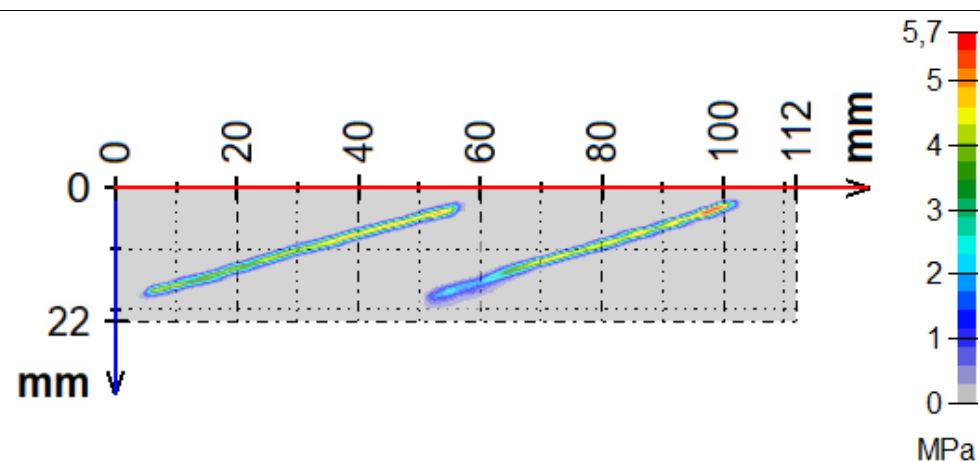
Nalezení optimálních úhlů  
natočení a roztečí trysek

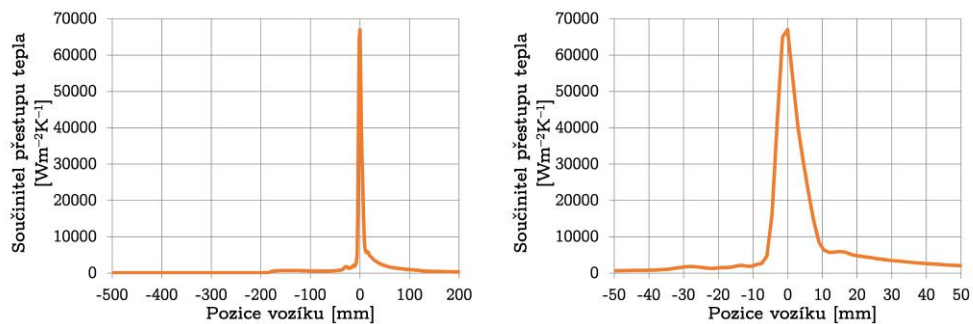
Experiment:	<b>I501</b>
Tryska:	Tryska 5
Tlak:	40 MPa
Výška:	55 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	0°
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm



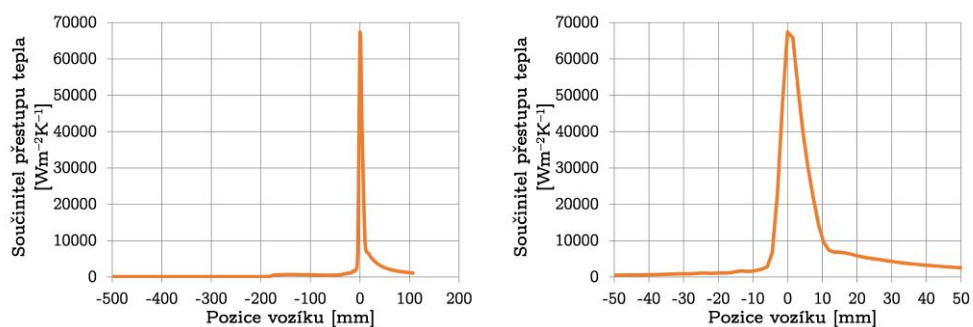


Experiment:	<b>I509</b>
Tryska:	Tryska 5
Tlak:	40 MPa
Výška:	55 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	15°
Velikost senzoru:	Ø 1 mm

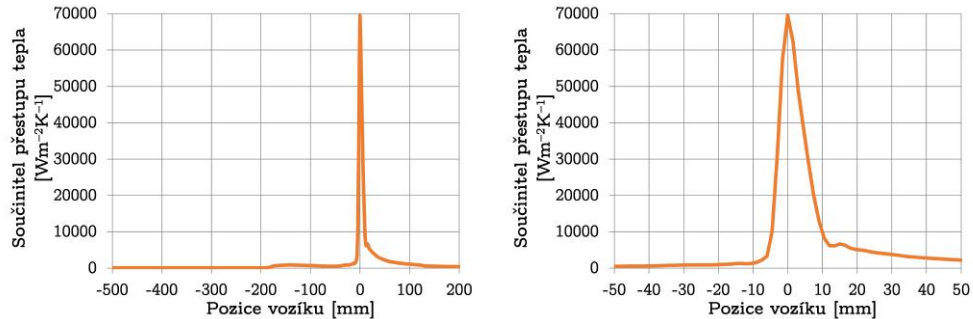




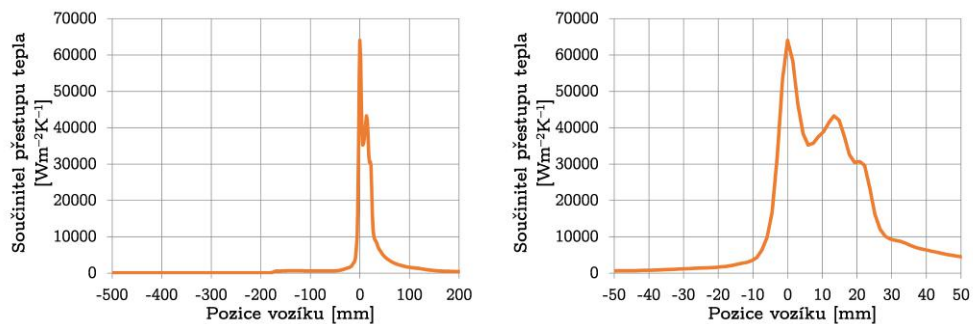
Obr. E.1: Podrobný výsledek experimentu H501.



Obr. E.2: Podrobný výsledek experimentu H503.



Obr. E.3: Podrobný výsledek experimentu H506.



Obr. E.4: Podrobný výsledek experimentu H509.

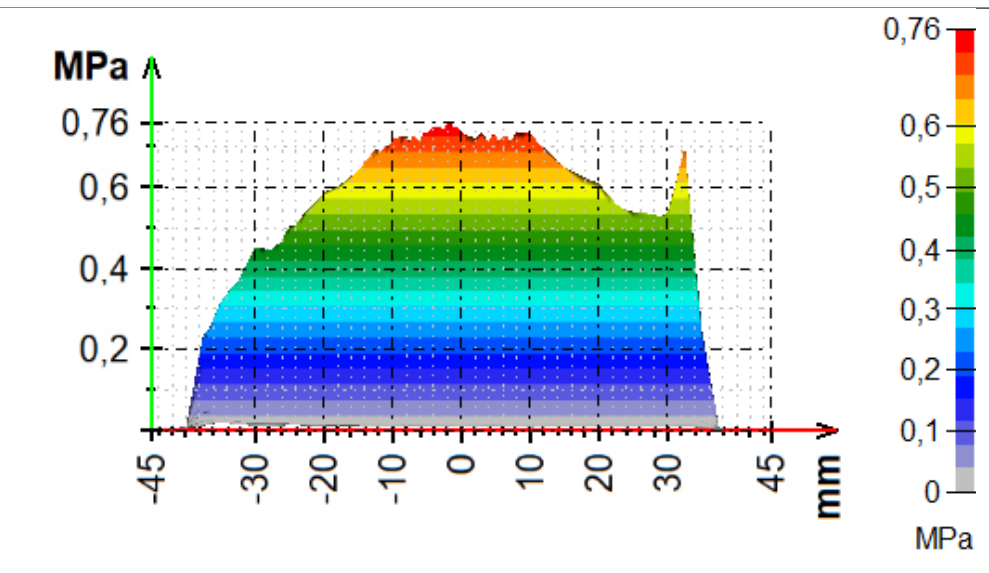
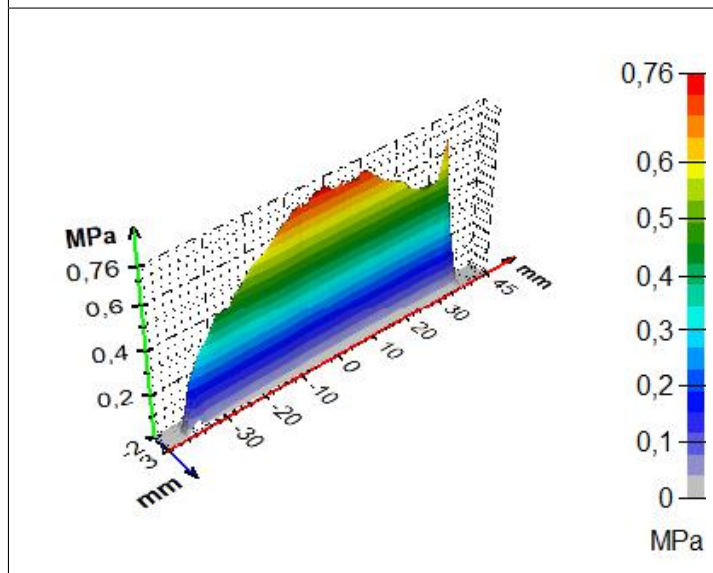
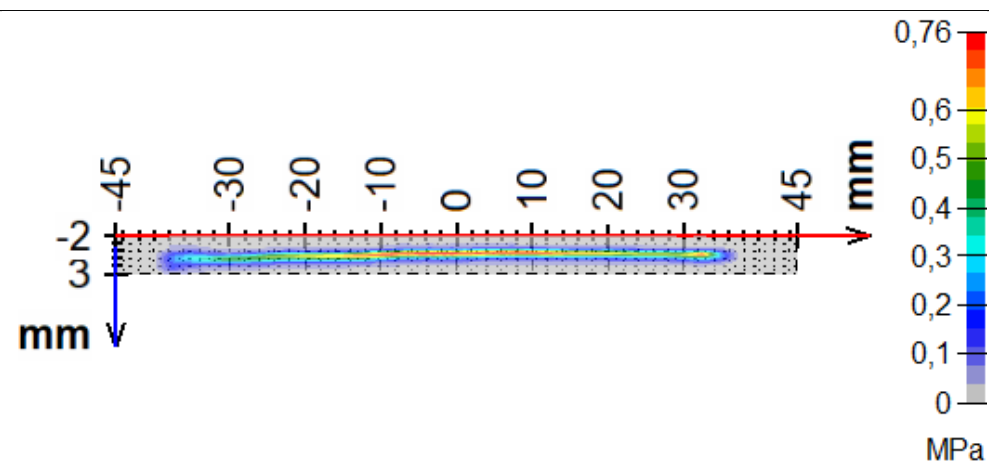


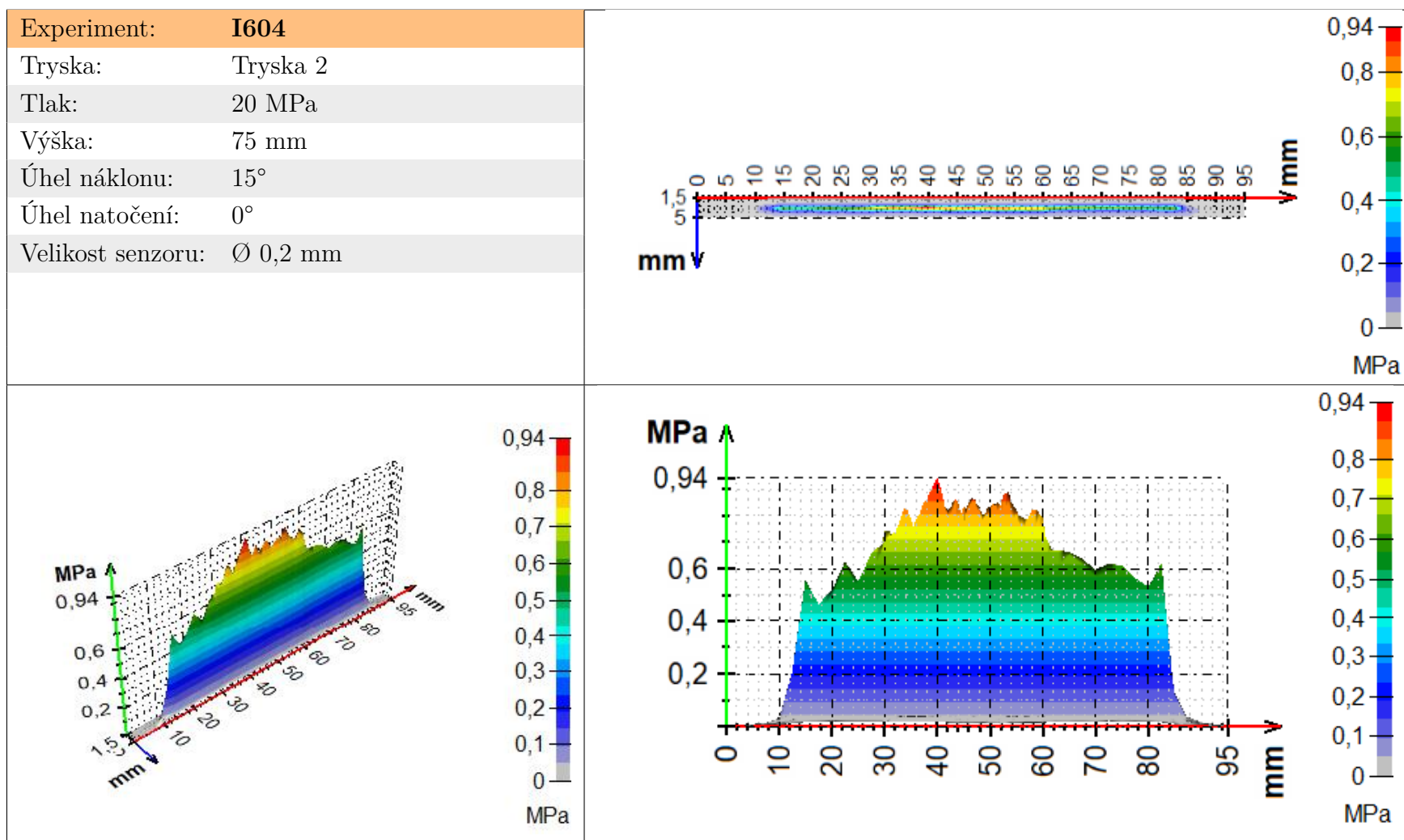
# PŘÍLOHA F

Experimentální studium vlivu  
rychlosti posuvu ve směru  
válcování na součinitel přestupu  
tepla

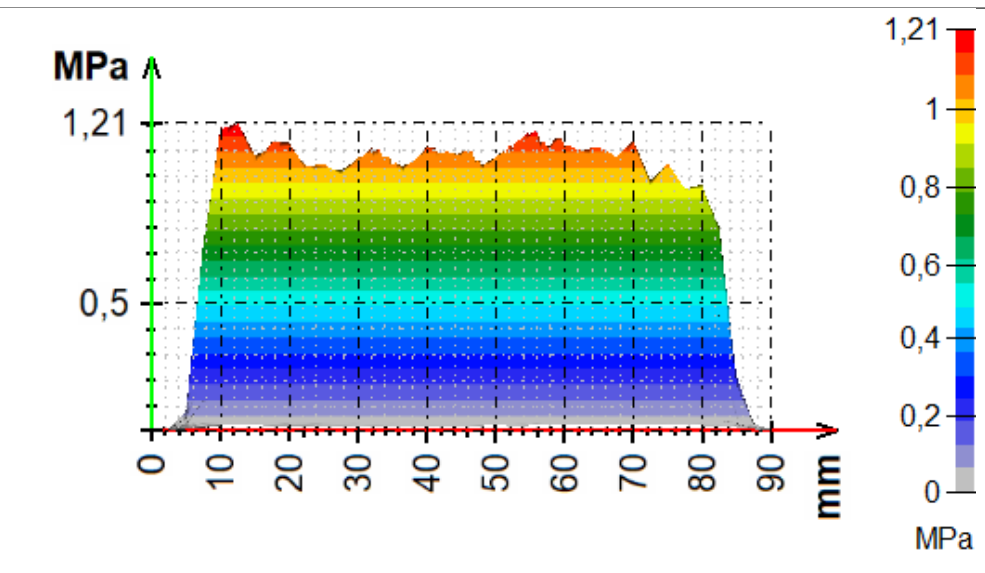
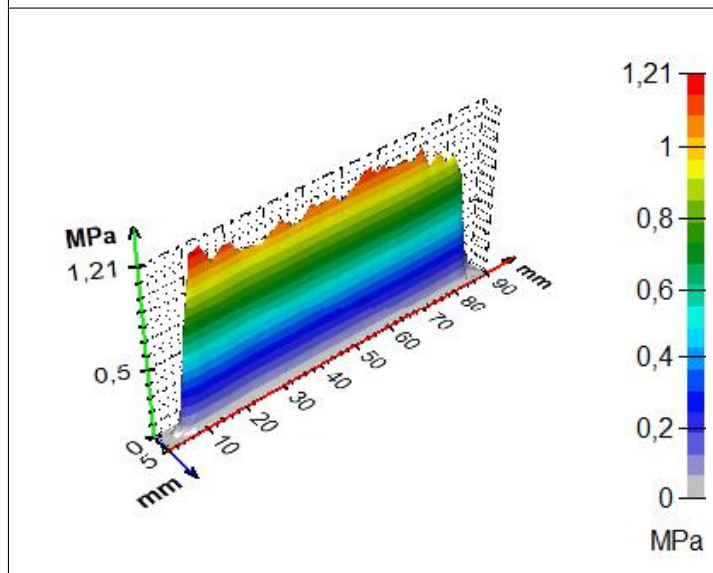
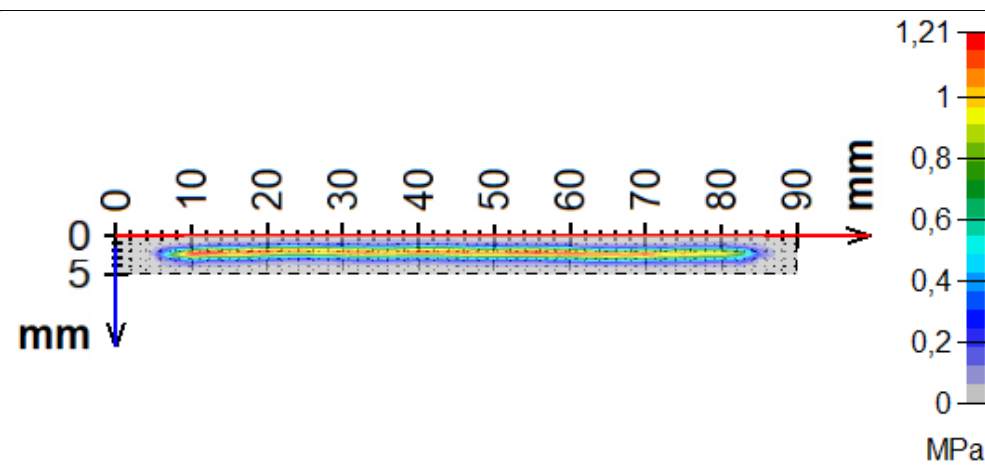


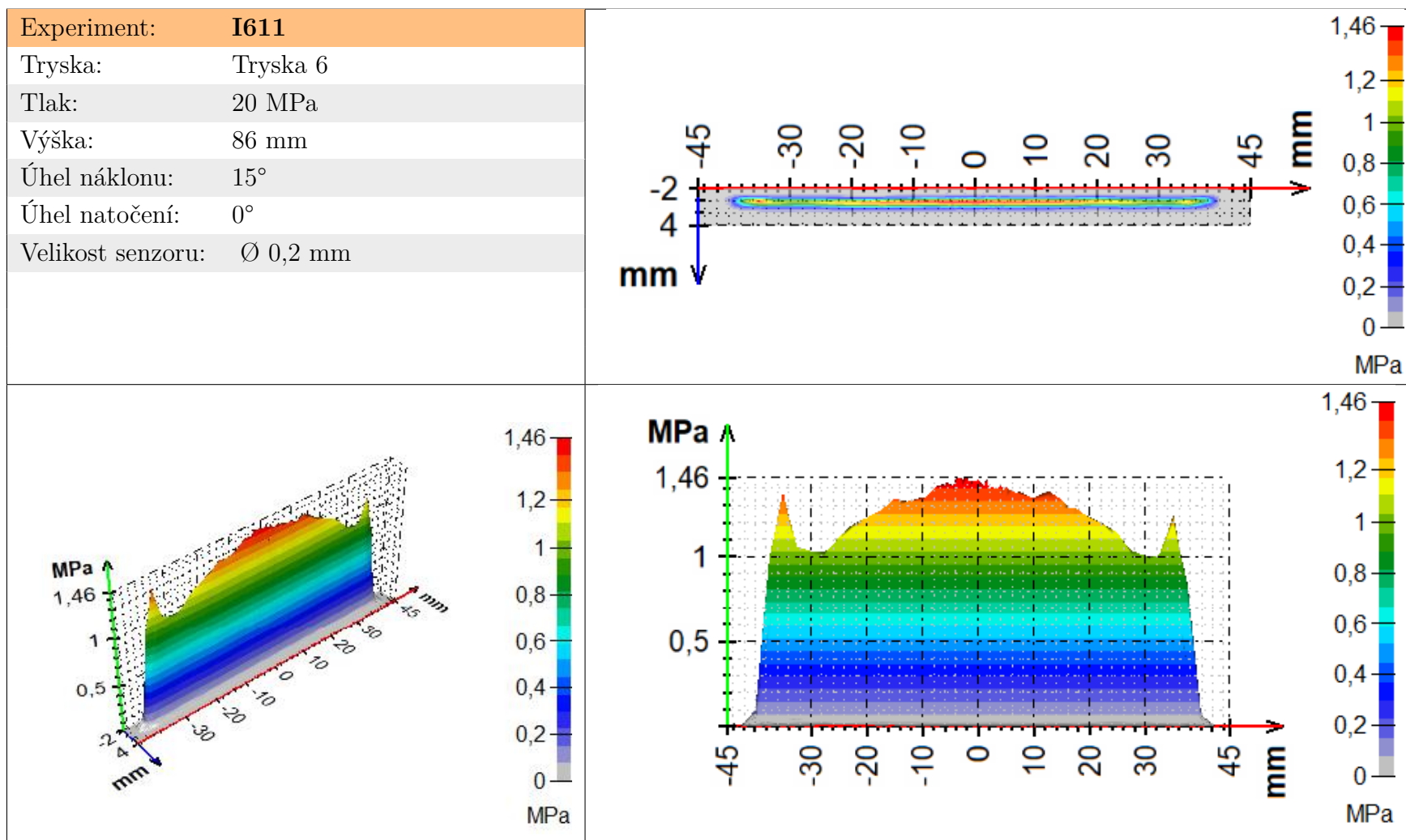
Experiment:	<b>I601</b>
Tryska:	Tryska 1
Tlak:	20 MPa
Výška:	79 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	0°
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm



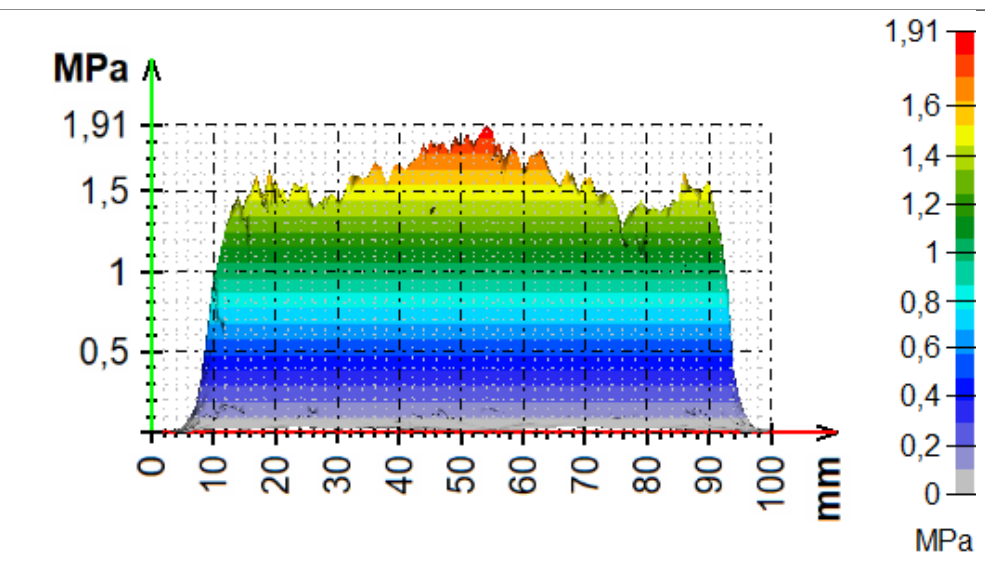
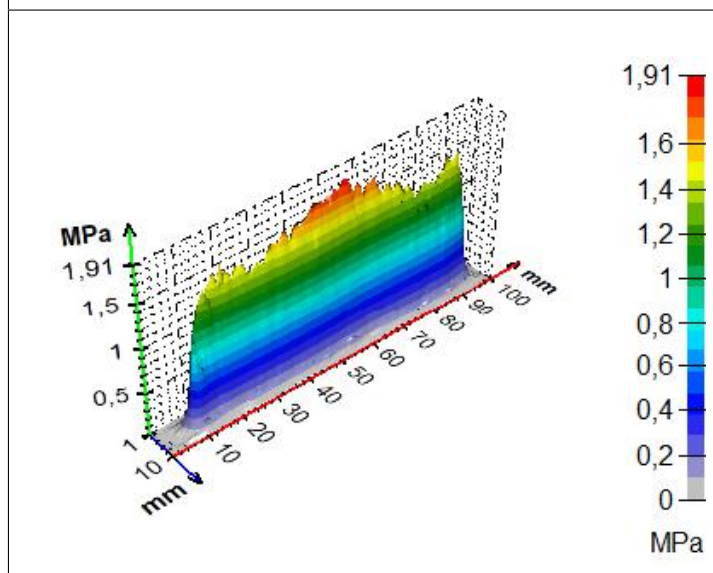
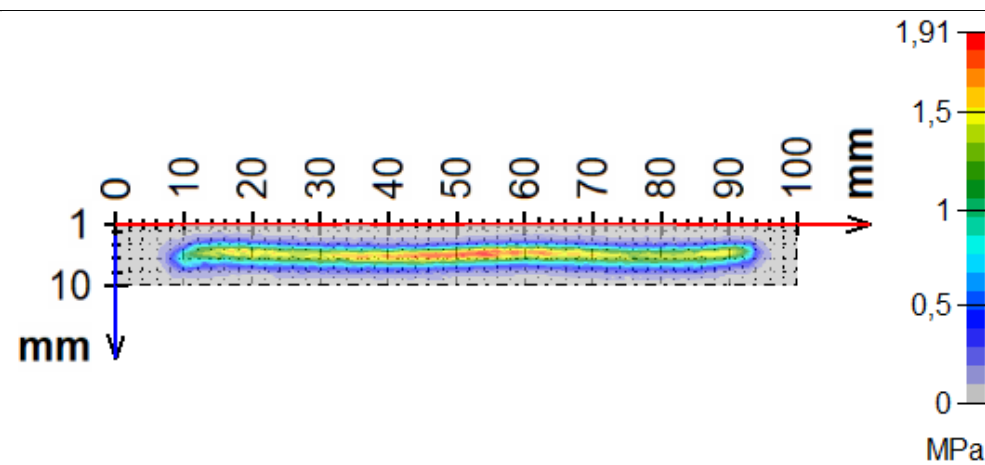


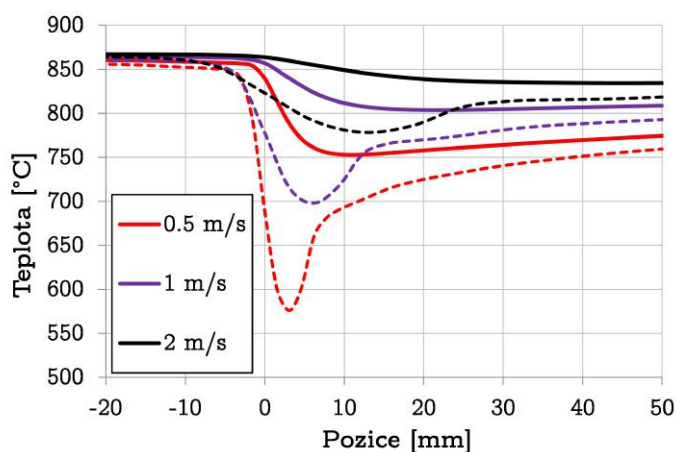
Experiment:	<b>I607</b>
Tryska:	Tryska 5
Tlak:	20 MPa
Výška:	93 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	0°
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm



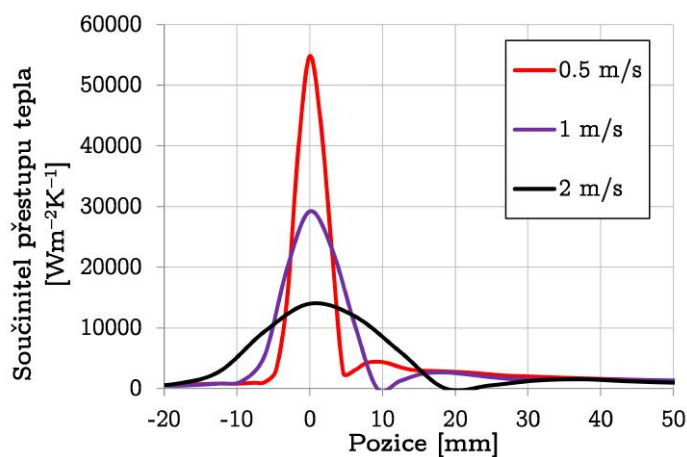


Experiment:	<b>I614</b>
Tryska:	Tryska 9
Tlak:	30 MPa
Výška:	150 mm
Úhel náklonu:	15°
Úhel natočení:	0°
Velikost senzoru:	Ø 0,2 mm

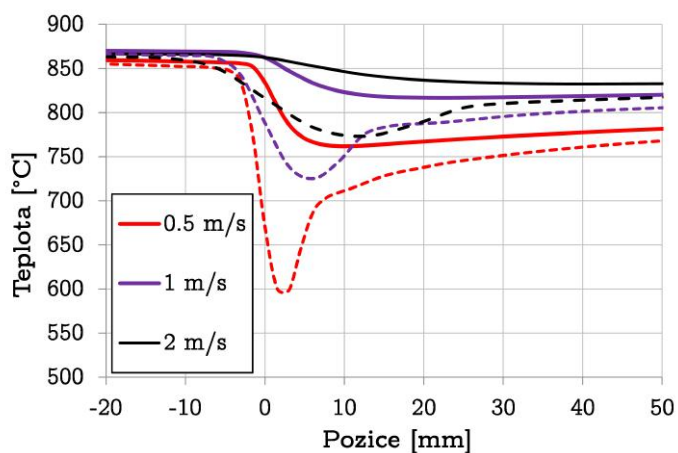




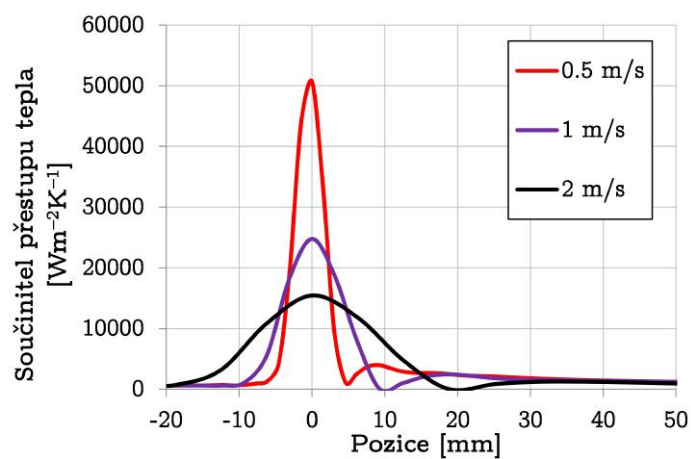
Obr. F.1: Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 1.



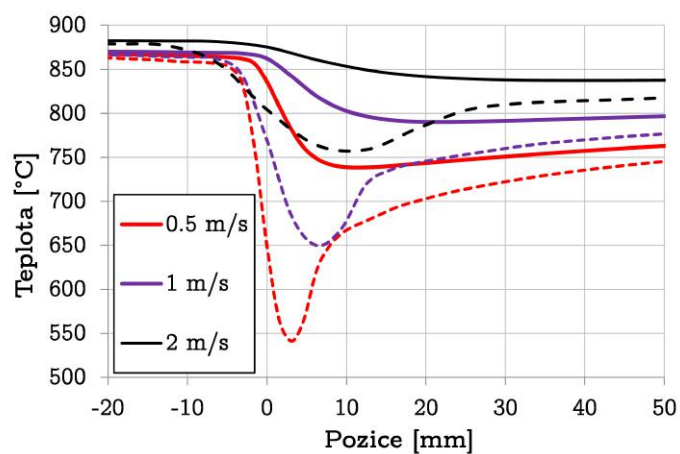
Obr. F.2: Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 1.



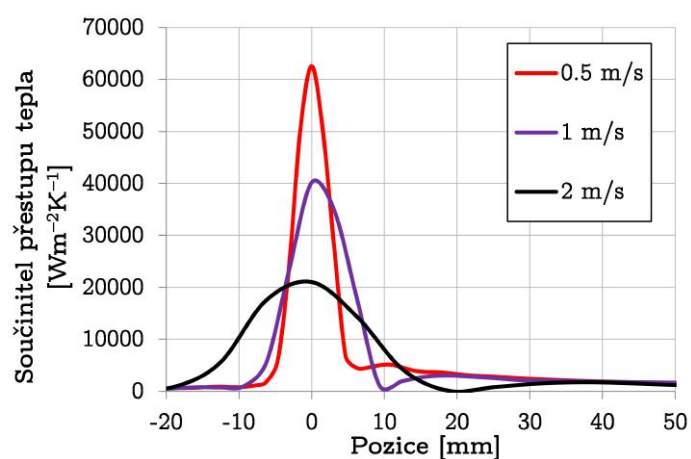
Obr. F.3: Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 2.



Obr. F.4: Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 2.

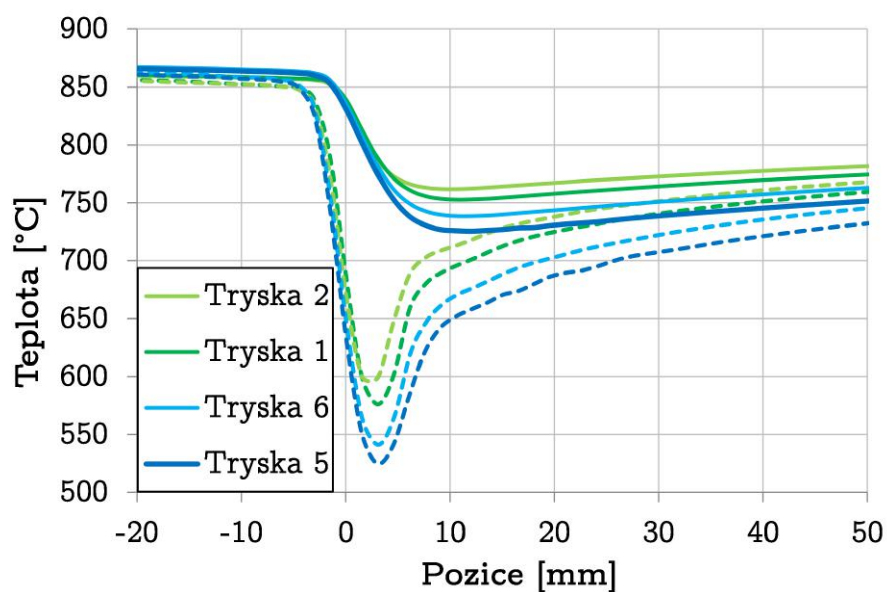


Obr. F.5: Vývoj teploty v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 6.

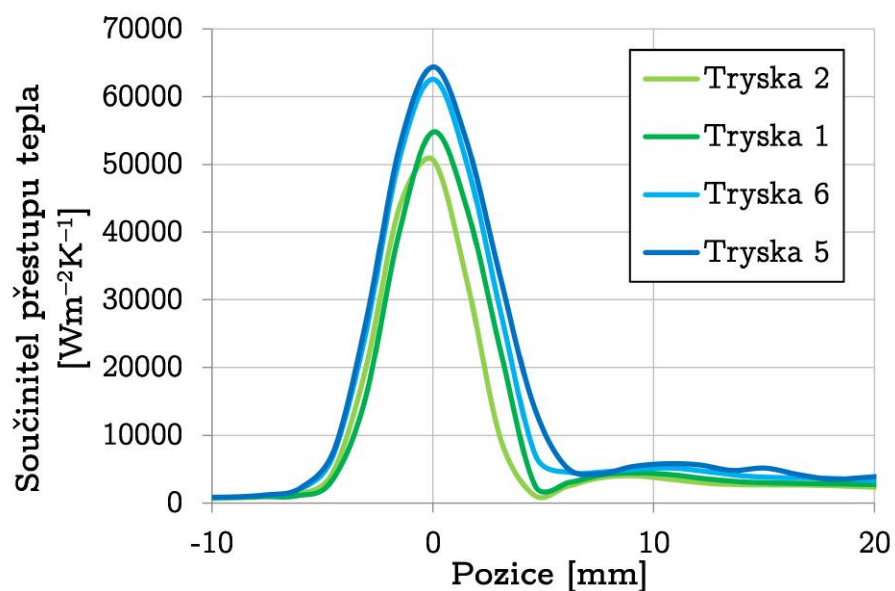


Obr. F.6: Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici a rychlosti vzorku pro Trysku 6.





Obr. F.7: Vývoj teploty v závislosti na pozici vzorku pro jednotnou rychlost 0,5 m/s.



Obr. F.8: Vývoj součinitele přestupu tepla v závislosti na pozici vzorku pro jednotnou rychlost 0,5 m/s.